

Prof. Dr.-Ing. W. Pluschkell

Institut für Metallurgie

TU Clausthal

Der Kosmos, die Erde und Eisen und Stahl

(Juni 2010)

Prolog

Das Periodensystem der Elemente (PSE)

Das Bild 1 zeigt das PSE in seiner heutigen Gestalt. Es geht zurück auf Vorarbeiten von J. W. Döbereiner und auf wissenschaftliche Beiträge von D. J. Mendelejew und J. L. Meyer im 19. Jhrdt. und beruht auf Prinzipien der Quantenphysik, entwickelt in der 1. Hälfte des 20. Jhrdt.

Kurzgefaßte Erläuterungen:

- Namen der Elemente mit einem oder zwei Buchstaben abgekürzt (aus der griechischen Antike, dem Lateinischen, nach Naturforschern, Kunstnamen); Beispiele:

H : Hydrogenium
He : Helium

Fe : Ferrum
Ga : Gallium

Ge : Germanium
Bh : Bohrium

- Fortlaufende Numerierung der Elemente mit 1 beginnend (Wasserstoff) bis vorläufig 116. Ab Nr. 84 (Polonium) sind die Elemente radioaktiv; Ausnahmen Nr. 43 (Technetium) und Nr. 61 (Promethium). Von den 81 stabilen Elementen sind 14 Nichtmetalle (H, He, C, N, O, F, Ne, P, S, Cl, Ar, Br, Kr, Xe), 7 Halbmetalle (B, Si, Ge, As, Se, Sb, Te), der Rest von 75% sind Metalle. In der Natur kommen 93 Elemente vor.
- Das Element-Atom ist strukturiert (und damit teilbar): Es besteht aus Protonen und Neutronen (Nukleone) des Atomkerns und aus Elektronen der Atomhülle. Radius der Elektronenhülle rd. 10^{-10} m, Radius des Kerns rd. 10^{-14} m, Volumenverhältnis rd. 10^{12} (Vergleich: Sandkorn von 1 mm^3 in einem großen Haus von 1000 m^3). Der Kern enthält rd. 99,9 % der gesamten Atommasse.
- Die Anzahl der im Atomkern vorhandenen, positiv geladenen Protonen wird mit Z (Kernladungszahl), die der Neutronen (elektrisch neutral) mit N bezeichnet. Die Atomhülle wird aus Z negativ geladenen, fast masselosen Elektronen gebildet, so daß das Atom als Ganzes elektrisch neutral erscheint. Für die Massenzahl A gilt $A = Z + N$. Daraus folgt für die Atom-Identifizierung die Notation



- ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ bedeutet also: Eisenatom mit 26 Protonen und $56 - 26 = 30$ Neutronen im Kern, sowie 26 Elektronen in der Elektronenhülle. Die Nummer des Elements im PSE ist gleichzeitig seine Kernladungszahl (d.i. die Protonenanzahl im Kern). Atomkerne, bei denen das Verhältnis von Neutronen zu Protonen Grenzwerte überschreitet, zerfallen durch Radioaktivität.
- Die weitere Ordnung im PSE ergibt sich aus der Struktur / dem Feinbau der Elektronenhülle, dem „Schalenmodell“. Die waagerechten Zeilen mit steigenden Ordnungszahlen bilden 7 Perioden, in denen die Anzahl der Elektronenhauptschalen (Hauptquantenzahl n) bis auf 7 zunimmt. Die Energiezustände der Einzelelektronen in den Schalen sind nach dem Pauli'schen Ausschließlichkeitsprinzip in Nebenquantenzahlen (l und m) strukturiert. Die senkrechten Spalten des PSE sind Elementgruppen oder Elementfamilien mit ähnlichen

chemischen und physikalischen Eigenschaften mit insgesamt 8 Hauptgruppen IA bis VIII A: Wasserstoff und Alkalimetalle (1), Erdalkalimetalle (2), Borgruppe (3), Kohlenstoffgruppe (4), Stickstoffgruppe (5), Chalkogene (6), Halogene (7), Edelgase (8). Von Gruppe zu Gruppe nimmt die Anzahl der Elektronen in der äußersten Hülle jeweils um eins zu (jeweilige Anzahl in Klammern). Bei den Übergangsmetallen, Seltenen Erden, Actiniden werden innere Elektronenschalen sukzessive aufgefüllt (Nebengruppen I B bis VIII B).

- Infolge unterschiedlicher Neutronenanzahl im Kern kann eine Atomart verschiedene Massenzahlen aufweisen: Atome mit gleichem Z aber unterschiedlichem A bezeichnet man als Isotope. Das Element Fe hat 4 Isotope unterschiedlicher Häufigkeit, so daß seine mittlere, relative Masse 55,847 beträgt (im Vergleich zu $^{12}_6\text{C}$).
- Mit Methoden der Spektrometrie kann die relative Masse von Atomen (und die Ladung von Ionen) bestimmt werden. Dabei stellt sich heraus, daß das Kohlenstoffatom mit der Massenzahl $A=12$ auch rd. 12 mal so „schwer“ ist wie Wasserstoff ^1_1H als „leichtestes“ Element mit der Massenzahl $A=1$ (genau: 12,00000 und 1,00793). Die logische Frage ist dann: Ist Kohlenstoff aus Wasserstoff aufgebaut, und unter welchen Bedingungen ist eine derartige Element-Synthese möglich?
- Die relative Atommasse (Molekülmasse) eines Elementes (Moleküls) in Gramm ist die Basiseinheit Mol der Stoffmenge:

$$1 \text{ mol Fe} \triangleq 55,847 \text{ g Fe (natürliches Isotopengemisch)}$$
 1 Mol enthält $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ Atome (Moleküle). Die Avogadrozahl N_A ist eine Fundamentalkonstante, die aus der Definition „Mol“ folgt. Neueste Messungen an der Phys.-Techn. Bundesanstalt in Braunschweig haben 2003 ergeben: $N_A = 6,0221354 (18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Unter Berücksichtigung der Avogadrozahl erhält man für die Masse von einem Eisenatom den Wert

$$1 \text{ Atom } ^{56}\text{Fe} \triangleq 9,288 \cdot 10^{-26} \text{ kg.}$$
- Proton, Neutron, Elektron haben die relativen Massen 1,00728; 1,00867; 0,00055. Das häufigste Eisenisotop $^{56}_{26}\text{Fe}$ sollte deshalb in Summe die relative Masse 56,465 aufweisen; der Messwert ist jedoch nur 55,935. Die Differenz von - 0,530 oder - $9,46 \cdot 10^{-3}$ pro Nukleon ist der sogn. „Massendefekt“ des ^{56}Fe - Isotops.
- In Bild 2 sind Daten des Elementes Eisen zusammengestellt. Die atomphysikalischen Werte wurden bereits erörtert, für die makroskopischen Daten ergeben sich im Vergleich zu anderen Metallen folgende Gesichtspunkte:
 - Die Schmelztemperatur von Fe liegt mit 1536 °C vergleichsweise hoch. Schmelztemperaturen weiterer Metalle:
 Sn 232 °C; Ti 1668 °C; Mo 2610 °C;
 Cu 1083 °C; Pt 1769 °C; W 3380 °C.
 Die obere Temperaturgrenze der gegenwärtigen, technischen Pyrometallurgie (Feuermetallurgie) liegt bei rd. 1800 °C.

- Die Dichte von Eisen ist mit $7,86 \text{ g cm}^{-3}$ ebenfalls vergleichsweise hoch. Dichten weiterer Metalle unterschieden nach Leicht- und Schwermetallen:

Mg	$1,74 \text{ g cm}^{-3}$;	Cu	$8,96 \text{ g cm}^{-3}$
Al	$2,70 \text{ g cm}^{-3}$;	Au, W	$19,30 \text{ g cm}^{-3}$
Ti	$4,51 \text{ g cm}^{-3}$;	Pt	$21,40 \text{ g cm}^{-3}$.

- Die elektrische Leitfähigkeit von Eisen ist im Vergleich zu Kupfer um den Faktor rd. 5,6 geringer.
- Im Periodensystem liegen die wichtigsten Legierungselemente des Eisens in seiner unmittelbaren Nachbarschaft: Cr, Mn, Co und Ni. Außerdem Ti, V, Nb, Mo. Dem Kohlenstoff mit kleinem Atomradius kommt eine besondere Bedeutung zu.

Bisher sind dem Element Eisen keine besonderen Eigenschaften im Vergleich zu anderen Metallen zuzuschreiben.

I

Kernfusion als Mechanismus der Element-Synthese

Das Alter des Kosmos wird aus spektrometrischen Messungen der Fluchtgeschwindigkeit von Sternen (Rotverschiebung, Hubble-Konstante) zu rd. $15 \cdot 10^9$ Jahren berechnet. Die Temperatur des interstellaren Raums beträgt $2,73 \text{ K}$ (Temperatur der isotropen Hintergrundstrahlung). Sterne, Planeten, Planetoide, kosmischer Staub und hochverdünntes Gas bilden strukturierte Galaxien. Das Sonnensystem mit seinen Planeten gehört zur Galaxie der Milchstraße. Es entstand vor rd. $5,5 \cdot 10^9$ Jahren aus einer Materieansammlung von Wasserstoff, Helium, Eisen und Gesteinsstaub (O, Si, C, Mg).

Der Stern „Sonne“ ist das Ergebnis einer Materie-Sammlung durch Gravitation. Mit zunehmender Körpermasse steigt die Gravitationsenergie an, so daß im Zentrum der Sonne Temperaturen um $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ herrschen. Der Energietransport zur Sonnenoberfläche und die dortige Energieabstrahlung in den „kalten“ Weltraum bedingen Oberflächentemperaturen von rd. 5800 K .

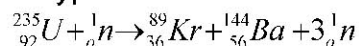
Im Zentrum der Sonne sind bei $> 10 \cdot 10^6 \text{ K}$ alle Atome vollständig ionisiert, so daß positive Atomkerne und abgelöste Elektronen den besonderen Hochenergiezustand der Materie, das „Plasma“, bilden. Außerdem ist im Zentrum der Sonne die Starttemperatur für die Fusion von Wasserstoff zu Helium überschritten. Die damit verbundene enorme Energie-Freisetzung verhindert den gravitativen Kollaps der Sonne, zumindest solange der vorhandene Brennstoffvorrat an Wasserstoff reicht; die Zeitperspektive liegt bei noch rd. $5 \cdot 10^9$ Jahren, jetzt ist also „Sonnenhalbzeit“.

In Sternen mit größerer Masse als die Sonne werden durch Gravitation noch höhere Temperaturen erreicht und damit weitere exotherme Fusionen ausgelöst: Die Fusion von He zu Kohlenstoff, zu Sauerstoff und Silizium und schließlich zum Endglied in der Kette zum $^{56}_{26}\text{Fe}$. Die Synthese aller schwereren Elemente als Eisen ist endotherm und erfordert Energiezufuhr. Damit ist Eisen ein ganz besonderes Element: Es ist der stabilste Atomkern aller Elemente. Es begrenzt das „nukleare Feuer“, Trans-

Eisen-Elemente sind zunehmend seltener. In Bild 3 sind die Fusionsreaktionen in vereinfachter Form sowie die zugehörigen Starttemperaturen zusammengetragen. Für die Fusion zu ^{56}Fe sind rd. 30 Sonnenmassen notwendig. Bei Erschöpfung der thermonuklearen Energiequellen unterliegt der Stern einem Gravitationskollaps: Eine Supernova schleudert die Sternmaterie in den kalten kosmischen Raum (SN 1987A; SN1993). In den Schockwellen der Explosion entstehen auch Atomkerne schwerer als Eisen.

Die Energie von Fusionsreaktionen wird nach der Einstein-Gleichung $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ (c ist die Lichtgeschwindigkeit $\triangleq 299\,793\,\text{kms}^{-1}$) aus dem Massendefekt Δm des gebildeten Atomkerns aufgebracht. Der Massendefekt des Isotops $^{56}_{26}\text{Fe}$ liefert nach der Einstein-Gleichung den ungeheuer großen Energiebetrag von 8,81 MeV pro Nukleon, wobei $1\,\text{eV} \triangleq 96,47\,\text{kJmol}^{-1}$. Die Fusionsenergie geht über in kinetische Energie des Plasmas, in γ -Strahlung von Photonen und energiereiche aber sehr massenarme Teilchen (Positronen und Neutrinos). In Bild 4 ist der Massendefekt pro Nukleon (Protonen + Neutronen) sowie die zugehörige Bildungsenergie als Funktion der Ordnungszahl Z aufgetragen. $^{56}_{26}\text{Fe}$ nimmt die Extremposition ein. Damit ist Eisen als stabilster Kern aller Elemente des Periodensystems nach H und He ein häufiges Element im Kosmos.

Umgekehrt zur Fusion leichter Elemente wird Energie auch durch Fission schwerer Elemente freigesetzt; z.B. durch natürlichen radioaktiven Zerfall von ^{238}U unter Abgabe von α - und β -Strahlung in ^{206}Pb . Bei Beschuß von ^{235}U mit thermischen Neutronen entsteht in 1. Stufe Krypton und Barium



mit einem Energieeffekt von 210 MeV. Diese Spallationsreaktion wird in Kernreaktoren zur Energieerzeugung genutzt. Kernspaltung ist aber auch der Mechanismus der Atombombenexplosion (Kettenreaktion). Dagegen ist die kontrollierte Kernfusion bisher nicht gelungen. Unkontrollierte Fusionen finden bei der Explosion einer Wasserstoffbombe statt.

Die Einstein-Gleichung liefert für 1 kg Massenverlust eine Energie von $9 \cdot 10^{16}\text{J}$. Der gesamte Energieverbrauch der BRD beträgt rd. $1,4 \cdot 10^{19}\text{J}$ pro Jahr; das entspricht einem Massenverlust von 156 kg pro Jahr. Oder auch: 444 Kraftwerke mit jeweils 1 GW Leistung.

II

Die Erde als Rohstoffspeicher

Die Erde ist als Planet der Sonne durch gravitativen Einfang von kaltem Kosmos-Schutt - darunter auch Wassereis - vor rd. $5,4 \cdot 10^9$ Jahren entstanden. Zunächst zunehmende Masse und damit zunehmende Gravitationsenergie erhöhen die Temperatur auf einige Tausend Grad, so daß die Erde in einen flüssigen Rotationskörper mit abgeflachten Polbereichen übergeht. In der darauf folgenden Phase nimmt die Massenzufuhr aus dem nunmehr weitgehend geleerten Raum ab und kommt bis auf vereinzelte Einschläge unterschiedlich großer Meteorite vollständig zum Erliegen. Als Folge sinkt die Erdtemperatur durch Oberflächenabstrahlung: Es bilden sich die Erdkruste (maximal 40 km Dicke) als Lithosphäre, die Hydrosphäre

der Ozeane mit rd. 70 % Flächenanteil und die gravitativ gefesselte Atmosphäre. Die Dichte- und Temperaturdifferenzierung endet in dem durch seismische Messungen bestätigten Schalenaufbau der Erde nach Bild 5: Der Erdkern besteht aus festem Eisen und Nickel, der Mantel aus flüssigen und festen Bestandteilen, die Erdkruste überwiegend aus oxidischen Gesteinen. Unterschiede in der Rotationsgeschwindigkeit von Kern und flüssigem Material erzeugen das Magnetfeld der Erde. Das Temperaturfeld im Erdinneren wird aufrecht erhalten durch den radioaktiven Zerfall (Fission) von Uran und Thorium.

Die Erdbahn befindet sich in der Ökosphäre der Sonne von rd. 142 bis 205 Millionen Kilometern Abstand, in der die Verbindung H_2O in allen drei Phasenzuständen Dampf/Wasser/Eis bestehen kann. Dem entspricht ein Temperaturbereich von durchschnittlich 0 bis $+40\text{ }^\circ\text{C}$ (Tripelpunkt des Wassers: 273,16 K; 612 Pa). Die Atmosphäre erstreckt sich rd. 1000 km in den Raum und besteht heute in Bodennähe aus rd. 78 Vol.-% N_2 , 21 Vol.-% O_2 , < 1 Vol.-% Edelgase, bis 4 Vol.-% H_2O ; molekularer H_2 ist nicht vorhanden. Von besonderer Bedeutung ist das Gas CO_2 mit heute 385 ppm als Reaktionsstoff für die Photosynthese von organischen Verbindungen und Sauerstoff. Der molekulare Sauerstoff der Erdatmosphäre ist ausschließlich durch Photosynthese entstanden. Außerhalb der Sonnenökosphäre befinden sich die Umlaufbahnen der Feststoffplaneten Merkur, Venus und Mars. Der Erdtrabant Mond besitzt wegen zu kleiner Masse keine Atmosphäre und ist vollständig durcherstarrt. Die massereichen Außenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun besitzen ausgedehnte Gashüllen überwiegend aus H_2 , He, CH_4 , NH_3 . Der kleinste Planet Pluto hat eine Atmosphäre aus N_2 .

Aus Bild 6 geht die Häufigkeit der Elemente in der zugänglichen Erdkruste hervor. Häufigste Elemente sind Sauerstoff und Silizium (Silikate). Es folgt die Gruppe Al bis K mit jeweils mehr als 1 %, dazu gehört auch Fe mit 5,63 % an 4. Stelle. Von Interesse ist auch die 9. Stelle des Metalls Ti. Für die Metallurgie des Eisens sind von Bedeutung: Kohlenstoff (15. Stelle), Sauerstoff, die Legierungselemente, die Störelemente S und P. - Cu ist ein vergleichsweise seltenes Element, dies gilt vor allem für die Edelmetalle Ag, Au, Pt. Allgemein zeigt sich, daß Trans-Eisen-Elemente selten sind (< 10 ppm; auch das leichte Element Be ist selten).

Die genannten mittleren Gehalte sagen wenig aus über die wirtschaftliche Gewinnbarkeit der einzelnen Metalle. In dieser Hinsicht sind naturgegebene Anreicherungen zu konzentrierten Erzlagerstätten von besonderer Bedeutung. Die Bildung von vielen Lagerstätten wird bestimmt von Vulkanismus, Erosion (durch Wasser, Wind, Temperaturwechsel), Sedimentation und Metamorphose (R. Gheyselinck: „Die ruhelose Erde“). Der entsprechende geologische Kreislauf ist in Bild 7 dargestellt. Kalkstein und Quarz entstehen durch anorganische Reaktionen in wässrigen Lösungen aber auch durch Biogenese (Korallen, Kieselalgen). Wesentlich für die weltweite Gewinnung von Eisen und damit für Stahl sind die hochangereicherten Magnetit- und Hämatit-Lagerstätten in Brasilien, Ukraine, Australien, Rußland, Schweden. Wie noch zu zeigen sein wird, kommt den biogenen Flözen der Kohle als Reduktionsmittel und Energiequelle eine gleich große Bedeutung zu. Die weltweiten Vorräte an reichen Eisenerzen werden auf $300 \cdot 10^9$ t, die an Steinkohlen auf $600 \cdot 10^9$ t geschätzt.

Eisenerze sind Oxiderze. Die chemischen Eisen-/Sauerstoff-Verbindungen Fe_3O_4 und Fe_2O_3 werden als Magnetit und Hämatit bezeichnet. Das einfachste Eisenoxid

FeO („Wüstit“) kommt in der Natur nicht vor, entsteht aber intermediär bei der Eisenerzreduktion in technischen Prozessen. Abgebaute Erze werden aufbereitet, um deren Eisengehalt weiter anzureichern: Brechen, Mahlen, Sieben, physikalische Aufbereitung. Ergebnis: Eisenerzkonzentrat mit Korngrößen $< 2 \text{ mm } \varnothing$. In Bild 8 sind beispielhaft die Analysen von zwei schwedischen Eisenerzkonzentraten zusammengestellt. Bis zu 97% Fe_3O_4 d.s. fast 71% Fe. Sehr geringe Gehalte an störenden Fremdelementen. CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 werden im reduktiven Hochofenprozeß bei etwa 1450°C als Schlacke (Oxidschmelze) abgetrennt: Pyrometallurgie der Roheisenerzeugung. Die Erz-Aufbereitung hat die Absenkung der Gehalte an dem Mineral Apatit als P-Träger zum Ziel, weil dieses Mineral unter Hochofenbedingungen reduziert und P im Roheisen als Störelement gelöst wird. Bild 9 gibt Auskunft über Erze und Konzentrate verschiedener Gebrauchsmetalle. Die Aufbereitung und Anreicherung der meist armen Erze zu Konzentraten ist vergleichsweise aufwendig. Der Schiffsversand von Eisenerzkonzentraten betrug 2007 weltweit $800 \cdot 10^6 \text{ t}$, die Eisenerzeinfuhr in die BRD rd. $41 \cdot 10^6 \text{ t}$.

Lagerstätten der Kohle sind biogene Sedimente. Mit steigendem Inkohlungsgrad unter weitgehendem Luftabschluß sind zu unterscheiden: Torf, Braunkohle, Steinkohle, Anthrazit, Graphit. Steinkohle weist rd. 75 % Kohlenstoff auf neben Feuchte und flüchtigen Elementen: H, N, O. Es enthält das Störelement Schwefel mit rd. 1 Gew.-%. Zur Kokserzeugung sind nur spezielle Steinkohlensorten geeignet.

III

Energetik chemischer Reaktionen

Bei Temperaturen unterhalb des Plasmazustands - also allemal unter Temperaturbedingungen der Erdkruste - sind die Elektronen den Atomen entsprechend ihrer Kernladungszahl zugeordnet. Das separate Atom weist nach außen keine Ladung auf: $n_{\text{El}} = n_{\text{Pr}} = Z$. Atome können zu Molekülen reagieren, deren Aufbau von der Struktur der äußeren Elektronenhülle abhängig ist. Dieses Gebiet der Atomphysik wird allgemein als „Chemie“ bezeichnet. In grober Annäherung ist festzustellen, daß jene Reaktionen energetisch begünstigt sind, bei denen Strukturen entstehen mit 2 oder 8 Elektronen in den äußeren Molekülorbitalen. Auf dieser Basis ergeben sich zunächst zwei Bindungstypen: Kovalente Bindung unter Ausbildung gemeinsamer Elektronenpaare zwischen den Atomen. Beispiel: H_2O . Ionenbindung bedeutet Elektronenübergang zwischen unterschiedlichen Atomen. Beispiel: Na^+Cl^- . Ein weiterer Bindungszustand liegt bei festen Metallen vor. Metallatom-Rümpfe bilden Gitterstrukturen. Außenelektronen sind an ein Gitter-Elektronengas abgegeben. Für die metallische Bindung ist eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit typisch.

Bild 10 zeigt beispielhaft vier hier besonders interessierende Reaktionen mit den zugehörigen energetischen Effekten bei $T = 1200 \text{ K} \triangleq 927^\circ\text{C}$. Es handelt sich um die Bildung von H_2 -, O_2 -, H_2O - und CH_4 - Molekülen mit kovalenter Bindung. Die Reaktionen 1) bis 3) sind homogene Gasreaktionen, die Reaktion 4) ist eine Heterogenreaktion zwischen festem Kohlenstoff und Wasserstoffgas (Kohlenstoff-Hydrierung). Die Reaktionen 1) bis 3) sind sehr stark exotherm, die Reaktion 4) deutlich schwächer exotherm. Im Vergleich zu Fusionsreaktionen sind die Reaktionsenthalpien ΔH^0 mit 1 bis 4 eV jedoch bescheiden, nämlich um rd. den Faktor 10^6 bis 10^7 geringer. Die Triebkraft der Reaktionen von links nach rechts wird

hier einstweilen beurteilt nach dem alten, manchmal nicht ganz falschen Kriterium „exotherme Reaktionsenthalpie“. Die moderne Thermodynamik gelangt jedoch zu einem grundsätzlich anderen Kriterium (siehe Abschnitt IV).

Die Erdatmosphäre weist keinen molekularen Wasserstoff H_2 auf; er ist durch Diffusion in den Weltraum verlorengegangen oder ist bei Sauerstoffüberschuß durch blitzgezündete Reaktion 3) in Wasserdampf überführt worden. CH_4 gehört wie CO_2 zu den Spurengasen der Atmosphäre. Die Erde ist mit den Ozeanen ein riesiger Wasser- und damit auch Wasserstoff-Speicher. Weitere Geospeicher für Wasserstoff und Kohlenstoff sind die unterirdisch eingeschlossenen Erdgas- und Erdöllagerstätten sowie für Kohlenstoff die ausgedehnten Kohleflöze.

Bei der Oxidation von Kohlenstoff entstehen nach Bild 11 zwei gasförmige Oxide: das giftige Kohlenmonoxid und das inerte, im Mittelpunkt der gegenwärtigen Klimadebatte stehende Kohlendioxid. Die erste, CO_2 liefernde Reaktion ist die stark exotherme Verbrennung von Kohlenstoff bei Sauerstoffüberschuß, Umsetzung 5). Bei Sauerstoffmangel (oder Kohlenstoffüberschuß) entsteht CO Umsetzung 6), wobei der Energiegewinn mit 113 kJ aber auf 29% von 5) sinkt (Genaueres in IV).

Bei der vollständigen und stöchiometrischen Verbrennung von Kohlenstoff zu CO_2 entsteht je kg C rd. 3,7 kg CO_2 . Der „Energiegewinn“ dient z.B. in Großkesselanlagen zur Erzeugung von hochgespanntem Wasserdampf, der in Turbinen mit einem maximalen Wirkungsgrad von z.Zt. 48% in elektrische Energie umgewandelt wird. Mit der Information $1\text{kWh} \triangleq 3,6 \cdot 10^3 \text{ kJ}$ folgt mit obigen Daten

$$1 \text{ kWh} \triangleq 0,227 \text{ kg C} \triangleq 0,834 \text{ kg CO}_2.$$

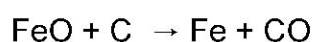
Die tatsächliche CO_2 -Emission bei der Erzeugung von Elektroenergie hängt vom sog. „Energienmix“ (Kohle-, Wasser-, Kernkraft- basierte Technik, erneuerbare Energie) eines Landes ab; für die BRD ist z.Zt. mit rd. 0,62 kg CO_2 je kWh zu rechnen.

Die Eisenoxide entsprechen eher dem Typ „Ionenbindung“, wobei das Eisenatom 2 oder 3 Elektronen an Sauerstoff abgibt (Wertigkeit des Eisens +2 oder +3). Aus Bild 12 geht die Stöchiometrie und der energetische Umsatz bei den Oxidationsreaktionen zu Wüstit, Magnetit und Hämatit hervor. An den Reaktionen sind jeweils drei Phasen beteiligt.

IV

Thermodynamik chemischer Reaktionen und die Stabilität von Oxiden

Wenn man das Oxid FeO mit Kohlenstoff im Überschuß vermischt und auf eine Temperatur von 1200 K bringt, entsteht metallisches Eisen und CO. Die erhöhte Temperatur ist notwendig, um hohe Umsatzgeschwindigkeiten zu erreichen. In diesem Experiment unter „Standardbedingungen“ hat also nachweisbar eine Reduktion nach



stattgefunden. Es ist jetzt mittels bereits bekannter ΔH°_{1200} - Daten zu prüfen, ob der Umsatz erwartungsgemäß „exotherm“ abläuft. Die Rechnung nach Bild 13 ergibt jedoch $\Delta H^\circ_{1200} = + 156,3 \text{ kJ}$, also eine „endotherme“ Reaktion, die nach bisherigem Kriterium unmöglich ist. Das vorliegende Problem wurde von R.J.E. Clausius gegen Ende des 19. Jhrdts. durch Einführung einer neuen thermodynamischen

Zustandsfunktion „Entropie“ gelöst (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Das richtige Entscheidungskriterium ist der Wert der Freien oder Gibb'schen Reaktionsenthalpie

$$\Delta G^{\circ} \text{ nach } \Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T \Delta S^{\circ},$$

die negativ sein muß, damit die Reaktion entsprechend vorgegebener Richtung abläuft *). Der zweite Term der rechten Seite obiger Gleichung umfaßt als Produkt die absolute Temperatur in K und die Reaktionsentropie in $\text{kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$. Der erste Term ist wie bisher die Reaktionsenthalpie (Wärmetönung der Reaktion) in kJ mol^{-1} . Die Tafelwerken oder Datenbanken zu entnehmende für die obige Reduktionsreaktion gültige ΔG° -Funktion

$$\Delta G^{\circ} = + 156,3 - 0,159 \cdot T \quad (\text{kJ mol}^{-1})$$

ergibt für 1200 K den negativen Wert $\Delta G^{\circ} = - 34,5 \text{ kJ}$; die Reaktion läuft, wie experimentell ermittelt, von links nach rechts ab. $\Delta G^{\circ}=0$ wird bei 983 K \triangleq 710 °C erreicht. Bei tieferen Temperaturen kehrt sich die Reaktionsrichtung unter FeO-Bildung und CO-Spaltung um, metallisches Eisen wird oxidiert. Nur oberhalb 710 °C kann FeO mit Kohlenstoff bei $p_{\text{CO}} = 1 \text{ atm}$ zu Eisen reduziert werden. Die positive Reaktionsenthalpie von 156,3 kJ mol^{-1} muß dem System zur Aufrechterhaltung von $T=1200\text{K}$ von außen zugeführt werden. $\Delta G = 0$ ist das Kriterium des „thermodynamischen Gleichgewichtes“ einer vorgegebenen Reaktion. Die Bedeutung der ΔG - Funktion für die gesamte chemische Reaktionstechnik ist evident. Zurückkehrend zu dem unzureichenden Bewertungskriterium von Abschnitt III, ist folgendes anzumerken: Das Vorzeichen von ΔH° bestimmt dann die Reaktionsrichtung, wenn das Produkt $T \Delta S^{\circ}$ demgegenüber ausreichend klein ist. Für manche Reaktionen ist das der Fall.

Die durchgeführten Berechnungen und die technologische Erfahrung haben noch eine wichtige Konsequenz: Mit Kohle ist für die Eisengewinnung aus seinen Erzen ein Naturstoff als Reduktionsmittel gefunden, der reichlich im Erdspeicher vorhanden ist (carbothermische Metallurgie). Die Thermodynamik zeigt, daß die Reduktion der Eisenoxide auch mit Wasserstoff bewerkstelligt werden kann. Das Reduktionsmittel H_2 ist jedoch vorher durch Erdgas-/Erdöl-Spaltung oder durch H_2O -Elektrolyse bereitzustellen; Maßnahmen, die einen erhöhten Energieaufwand erfordern und deshalb nur im Ausnahmefall ökonomisch sinnvoll sein können.

Für die Reduktion der Metalloxide oder die Oxidation der Metalle ist der Stabilitätsbereich des Oxids/des Metalls in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Sauerstoffdruck in der umgebenden Atmosphäre von größtem Interesse. Zur übersichtlichen und systematischen Darstellung wird die Stöchiometrie der Einzelreaktionen auf den Umsatz von 1 Mol O_2 normiert und ein Koordinatensystem mit der Ordinate $\Delta G^{\circ} = RT \ln p_{\text{O}_2}$ und der Abszisse Temperatur gewählt. Die ΔG° -Funktion einer bestimmten Reaktion bildet sich in einem derartigen Diagramm als Linie (meist Gerade) ab, die den Existenzbereich des oxidierten Zustands (oberhalb) und den des reduzierten Zustands (unterhalb) voneinander trennt.

*) Dies gilt bei Reaktionsführung unter Standardbedingungen, d.h. reine kondensierte Stoffe und Gaskomponenten unter 1 atm Druck; sonst

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln K \leq 0.$$

Bild 14 zeigt die quantitativen Zusammenhänge für Eisen und seine Oxide. Außerdem ist die ΔG° -Linie für die Reaktion $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ mit $p_{CO} = 1 \text{ atm}$ eingetragen. Die gestrichelte Gerade durch den Koordinatenursprung verbindet Punkte mit gleichem Sauerstoffpartialdruck; hier als Beispiel $p_{O_2} = 10^{-8} \text{ atm}$. Die Domäne von Hämatit erstreckt sich bei hohem, die des metallischen Eisens bei sehr niedrigem O_2 -Partialdruck. Die Existenzfelder von Magnetit und Wüstit ordnen sich dazwischen an. Wesentlich ist, daß alle Reduktions-/Oxidationslinien des Eisens eine positive Steigung aufweisen, eine Folge der negativen Reaktionsentropie ΔS° . Das heißt: mit steigender Temperatur steigt der Sauerstoffpartialdruck steil an; Eisen wird stabiler, die Eisenoxide werden instabiler. Entgegengesetzt verhält sich das System $C/O_2/CO$: Kohlenmonoxid wird mit steigender Temperatur stabiler (ΔS° ist positiv). Oberhalb seiner Kennlinie befinden sich die Oxide, die mit Kohlenstoff zu Metall reduziert werden können, unterhalb der Linie gilt das nicht. Die mit T steigende Stabilität des Oxids CO in Kontakt mit Kohlenstoff ist ein Eckpfeiler der carbothermischen Reduktions-Metallurgie.

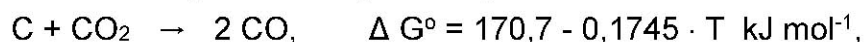
Die erörterte Stabilitätsthermodynamik gilt nicht nur für Eisen sondern auch für alle anderen Oxid/Metallsysteme. Bild 15 ist das erweiterte Ellingham-Richardson-Jeffes-Diagramm. Es zeigt sich, daß die Oxide Cu_2O , NiO , CoO (sowie auch ZnO , PbO ; nicht eingetragen) ebenfalls mit Kohlenstoff bei mäßigen Temperaturen, sowie Cr_2O_3 , MnO und SiO_2 bei hohen Temperaturen zu den jeweiligen Metallen reduziert werden können. Die carbothermische Metallurgie ist ebenfalls unentbehrlich bei der Gewinnung der Metalle Mo , W , der Ferrolegierungen; in modifizierter Form auch für Al und Ti . Probleme treten allerdings auf, wenn sich als Endphase nicht das Metall sondern das Karbid einstellt. Das gilt z.B. für das System $TiO_2/C/TiC$. In diesem Fall muß zur Gewinnung von Ti -Metall in der Endstufe die Metallurgie mit Chlor angewendet werden.

Aus dem Ellingham-Diagramm geht außerdem hervor, daß die Oxide Al_2O_3 , MgO und CaO extrem stabil und deshalb einer Reduktion mit Kohlenstoff nicht zugänglich sind (von speziellen Reaktionsdetails wird hier abgesehen). Da die genannten Oxide außerdem extrem hohe Schmelzpunkte aufweisen (Al_2O_3 : $2053^\circ C$; MgO : $2822^\circ C$; CaO : $2899^\circ C$; SiO_2 : $1725^\circ C$), sind sie in der Pyrometallurgie die Hauptkomponenten für die Feuerfest-Zustellung von Hochtemperatur-Reaktoren: Schamotte (Al_2O_3/SiO_2), Tonerde (Al_2O_3), Dolomit ($CaO + MgO$), Magnesit (MgO).

Die beiden Oxide des Kohlenstoffs CO und CO_2 waren bereits Gegenstand der Erörterung in Zusammenhang mit dem Thema „Verbrennung“. Unter dem Gesichtspunkt der technischen Reduktionsmetallurgie im Reaktor „Hochofen“ steht jedoch die Wirkung des Kohlenstoff-Überschusses im Vordergrund. Daraus ergibt sich die Frage, unter welchen Bedingungen die beiden Reaktionen



von links nach rechts ablaufen. Die Antwort der Thermodynamik lautet: Bei Temperaturen oberhalb rd. $1000^\circ C$ wird fast nur CO gebildet, bei $674^\circ C$ entsteht ein Gasgemisch $50\%CO / 50\%CO_2$ bei Temperaturen unterhalb $500^\circ C$ besteht das Gleichgewichtsgas fast nur noch aus CO_2 (alle Werte für einen Gesamtdruck von 1 atm). Die Kombination der obigen Umsatzgleichungen liefert



die sehr stark endotherme „Boudouard“-Reaktion (von links nach rechts gelesen).

Auf der Basis dieser thermodynamischen Informationen ergibt sich ein technisches Reaktionssystem, das für die Pyrometallurgie mit Kohlenstoff im Überschuß und dessen thermische und stoffliche Nutzung im Hochofenprozeß spezifisch ist. Dieses Reaktionssystem ist in Bild 16 skizziert.

- Zur Erzeugung der hohen Temperaturen in der Rast des Hochofens wird Heißluft (rd. 1200 °C) in der Blasformebene eingeblasen, die zusätzliche Energie von $\Delta H^\circ = -113,3 \text{ kJ}$ liefert die Umsetzung $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$. Die Verbrennung kann nur bis zum CO ablaufen, da auch hier Kohlenstoff im Überschuß vorliegt ("toter Mann"). Außerdem ist das abgestochene flüssige Roheisen an Kohlenstoff gesättigt.
- Bei Temperaturen um und über 1000 °C reagiert Eisenerz mit CO unter Bildung von Fe und intermediärem CO₂. CO₂ wird an Koks zu CO regeneriert, das wiederum den Reaktionsfortschritt vorantreibt. Zwischen stückigem Koks ($\varnothing \cong 35 \text{ mm}$) und stückigem Eisenerz ($\varnothing \cong 20 \text{ mm}$) befindet sich die Gasphase mit einem Stoffkreislauf von CO und CO₂.
- Bei Temperaturen unterhalb von 700 °C liefert die Oxidreduktion zwar wie bisher CO₂. Wegen der gesunkenen Temperatur findet aber keine Regeneration zu CO statt. Im Hochofengas sinkt der CO- und steigt der CO₂-Gehalt. Das Hochofen-Gichtgas enthält typischerweise rd. 20 Vol.-% CO, 20 Vol.-% CO₂, Rest überwiegend N₂. Das Gichtgas ist ein mittelpalorischer Energieträger, der durch vollständige Verbrennung im Cowper zur regenerativen Aufheizung des Blasform-Heißwindes genutzt wird.

Fazit: Die thermische Umsetzung des Kohlenstoffs im Hochofen gewährleistet die notwendigen Reaktionstemperaturen und liefert das Reduktionsgas CO. Die stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs besteht in der Reduktion der Eisenoxide zu Eisen. Thermische Nutzung und stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs im Hochofen bilden eine ausbalancierte, nicht auflösbare Einheit. Dies ist das Verfahrensprinzip des Hochofens mit dem größten Wirkungsgrad unter den Hochtemperaturreaktoren der Metallurgie. Auf die Reduktion der Eisenoxide in einem Schachtofen mit CO/H₂-Gas ohne Koks oder in einer Wirbelschicht wird im nachfolgenden Vortrag näher eingegangen.

VI

Phasen im System Eisen-Kohlenstoff

Die enge Symbiose von Eisen und Kohlenstoff ist mit den technischen Reduktionsprozessen keineswegs zu Ende. Sie setzt sich fort in der Vielfalt der Eisen- und Stahlwerkstoffe. Für eine erste Orientierung auf diesem Gebiet ist das Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff von Bild 17 besonders geeignet. Die Abszisse beschreibt die Zusammensetzung der Fe/C-Legierungen mittels des Kohlenstoffgehaltes in Gew.-%, die Ordinate deren thermischen Zustand mittels der Temperatur in °C. Markante Punkte im Diagramm sind mit großen Buchstaben gekennzeichnet.

Zunächst seien die thermischen Stabilitätsbereiche der reinen Eisenphasen angegeben: α -Fe ist stabil bis 911 °C (Punkt G), es folgt der Stabilitätsbereich von γ -Fe

bis 1392 °C (N), sodann der des δ -Fe bis zum Schmelzpunkt bei 1536 °C (A). Die Modifikationen α -Fe und γ -Fe unterscheiden sich in der Stapelfolge der Eisenatome im Metallgitter (raumzentriert und flächenzentriert, wie auf der linken Seite skizziert). δ -Fe hat dieselbe Struktur wie α -Fe. Außerdem weist Eisen eine Umwandlung 2. Art auf: Bei 744 °C (Curie-Temperatur) geht sein Ferromagnetismus in Paramagnetismus über. Mit Kohlenstoff bildet Eisen das metastabile, für die Werkstofftechnik aber relevante Karbid Fe_3C (Zementit).

Die Lösung von Kohlenstoff in den Eisen-Phasen vergrößert deren Existenzgebiet zu homogenen Phasenfeldern:

Fe/C-Schmelzen	: oberhalb A,B,C',D'
δ -Phase	: N,A,H
γ -Phase (Austenit)	: N,I,E',S',O,G
α -Phase (Ferrit)	: schmaler Streifen G,P',Q'

Alle anderen Felder des Diagramms sind Existenzgebiete von jeweils zwei Phasen; z.B. B,C',E',I: Schmelze im Gleichgewicht mit Austenit. Der Kurvenzug BC' bezeichnet die Liquiduslinie (bei höheren Temperaturen alle Legierungen homogen flüssig), der Kurvenzug IE' die Soliduslinie (bei tieferen Temperaturen alle Legierungen fest). Der niedrigste Schmelzpunkt der Fe-C-Legierungen liegt mit 1153 °C in dem Punkt C', hier stehen drei Phasen im Gleichgewicht: Austenit E', Schmelze der Zusammensetzung C' und Graphit F'. Wegen der Minimaltemperatur von 1153 °C wird die Schmelze C' als „Eutektikum“ bezeichnet. Weitere drei-Phasen-Gleichgewichte bei S' (Ferrit P', Austenit S' und Karbid Fe_3C : Eutektoid) und bei I (- (δ -Fe H, Austenit I, Schmelze B: Peritektikum). Eine metastabile Phase tritt auf beim schnellen Abkühlen von Austenit auf niedrige Temperaturen: die sehr harte/feste Phase „Martensit“; sie ist ein spezielles Markenzeichen der Fe/C-Legierungen.

Das Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff faßt die Forschungsergebnisse von rd. 100 Jahren zusammen; es stellt die Grundlage für das Verständnis der Stahlwerkstoffe dar. Und damit sind wir beim Thema: was ist „Stahl“? Im engeren Sinn: Fe/C-Legierungen bis maximal 2% Gew.-% C (Punkt E'), gekennzeichnet durch die Eigenschaften schmied- und warmwalzbar. Ansteigende Kohlenstoffgehalte erhöhen die Härte und Festigkeit des Werkstoffs Stahl. Legierungen mit mehr als 2 Gew.-% C sind sehr harte Gußlegierungen, das ist Gußeisen. Im erweiterten Sinn umfaßt „Stahl“ alle Legierungen des Eisens als Hauptkomponente mit anderen Metallen. Dazu gehören z.B. die nichtrostenden, hitze- und säurebeständigen CrNi-Stähle oder Magnetwerkstoffe auf der Basis Eisen. Das Bild 18 zeigt zur Illustration die Gefüge unterschiedlicher Fe/C-Stähle, und das Bild 19 die Gefüge von Graugußsorten. Die Werkstoffeigenschaften sind empfindlich von der Gefügebildung abhängig.

Die stabilen und metastabilen Phasen des Eisens kombiniert mit Wärmebehandlungs- und Umformverfahren eröffnen im Prinzip unbegrenzte Möglichkeiten zur Entwicklung von Stahlwerkstoffen, die in ihren Eigenschaften speziell an die jeweiligen Anforderungen angepaßt sind. Dieser Stahl-Horizont ist mit rd. 2000 gebräuchlichen Stahlsorten noch keineswegs ausgeschöpft. Hervorzuheben ist die sehr enge Zusammenarbeit zwischen Maschinenbau und Stahlbranche mit dem Ziel, Stahlspezialitäten zu entwickeln. Die Weltmarktführerschaft des deutschen Maschinenbaus ist zu einem erheblichen Teil dieser Symbiose geschuldet.

Zum Schluß sei nochmals anhand von Bild 17 auf die Prozeßtechnik der Stahlmetallurgie eingegangen. Das am Hochofen abgestochene, flüssige Roheisen weist Temperaturen im Bereich von 1400 bis maximal 1480 °C auf. Aus bekannten Gründen ist das Roheisen an Kohlenstoff gesättigt. Infolgedessen liegt seine Zusammensetzung auf der Linie C'D'. Im anschließenden Konverterprozeß wird aus Roheisen flüssiger Rohstahl erzeugt mit einem Kohlenstoffgehalt von rd. 0,03 Gew.-% und einer Abstichtemperatur von rd. 1700 °C, - dieser Zustand liegt oberhalb Punkt A. Die für die Überhitzung der Schmelze notwendige Energie liefert die Umsetzung von gelöstem Kohlenstoff mit Sauerstoff, der auf oder durch die Konverterschmelze geblasen wird. Die exotherme Enthalpie der Haupt-Reaktion $[C] + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ sowie die weiteren Neben-Oxidationsreaktionen reicht aus, um zusätzlich zur Rohstahlüberhitzung das Raffinationsmittel Kalk und eine begrenzte Menge Schrott einzuschmelzen.

Das 100%ige Recycling von Stahlschrott ist volkswirtschaftlich verpflichtende Notwendigkeit. Zu diesem Zweck werden Elektrolichtbogenöfen eingesetzt. Die für das Schmelzen des Schrotts notwendige Energie ist zum größten Teil Elektroenergie. Auch diese Energieart ist in der BRD mit der Verbrennung von Kohle und mit CO₂-Emissionen verbunden. Über die gegenwärtige Äquivalenz von Elektroenergie/CO₂-Emission wurde bereits in Abschnitt III berichtet. Dem Werkstoff Stahl ist schließlich eine praktisch unbegrenzte Recyclingfähigkeit unter Werterhalt zuzuschreiben. Das Recycling von Kunststoff ist dagegen mit einem unvermeidlichen „Down-Grading“ verbunden.

Epilog

Zusammenfassung mit einem beunruhigten Ausblick

- Auf der Erde existieren große Lagerstätten an Steinkohle und reichen Eisenerzen. In carbothermischen Prozessen der Metallurgie wird aus Eisenoxid das Metall Eisen und damit auch Stahl gewonnen. Im Rahmen dieses Seminars „Einführung in die Metallurgie von Stahl“ werden die Grundzüge dieser Prozesse vom Hochofenverfahren bis zum Stranggießen dargestellt. Dabei steht das Thema „Energie“ unmittelbar oder mittelbar im Zentrum der Ausführungen. Der in der Stahlindustrie praktizierte Energieverbund hat zu stetig fallendem Energiebedarf dieser Branche geführt. Zahlreiche Entwicklungen in der Metallurgie haben dazu beigetragen, daß die carbothermischen Prozesse nahe am thermodynamischen Energieminimum geführt werden. Unter Einbeziehung des Schrott-Recyclings leistet die Stahlindustrie einen herausragenden Beitrag zum Konzept des nachhaltigen Wirtschaftens.
- Eisen ist ein sehr wandlungsfähiger Werkstoff. Phasenumwandlungen, Legierungsbildung, metastabile Zustände, Umformung, Wärmebehandlung, Oberflächenveredelung u.a.m. sind die physikalisch-technische Basis für rd. 2000 verschiedene, handelsübliche Stahlsorten. Die besonderen Eigenschaften des Elements Eisen eröffnen einen praktisch unbegrenzten Horizont zur Gestaltung „maßgeschneiderter“ Eigenschaften von Stahlwerkstoffen. Stahl in seinen Varietäten ist auf vielen Gebieten konkurrenzlos günstig in seinem Preis-/Leistungsverhältnis. Diese Aspekte darzustellen ist das Thema des Nachfolge-

seminars unter dem Titel „Einführung in die Werkstofftechnik von Stahl“. Außerdem ist eindeutig: Neue Technologien zur Reduktion des Energieverbrauchs oder die Nutzung „alternativer Energien“ (d.h. Energiebereitstellung ohne Kohlenstoffeinsatz) ist ohne Innovationen auf dem Gebiet der Stahlwerkstoffe nicht machbar.

- Die carbothermische Metallurgie emittiert unvermeidlich das Endprodukt CO₂ in die Atmosphäre der Erde. Das gleiche gilt für die Kraftwerkstechnik auf der Basis Kohle und für den gesamten Verkehrsbereich. Das vom Photosynthesegas zum Klimagas umgetaufte CO₂ veranlaßt den politischen Gesetzgeber zu rigorosen Eingriffen in die Wirtschaft in Form von Emissions-Poenalen. Für die Metallurgie existieren mittelfristig durchaus Alternativen, z.B. die Metallurgie auf der Basis von Wasserstoff. Dieser Ausweg führt unvermeidlich zu wesentlich höherem Energieaufwand mit gravierenden Auswirkungen für den hiesigen Wirtschaftsstandort. In dieser Lage ist außerdem zu berücksichtigen, daß weder Indien, Rußland, China oder Brasilien und am Ende auch nicht die USA diesem besonderen politischen Trend in der BRD folgen werden. Es ist an der Zeit nach Max Weber (Vortrag am 25.01.1919) die Politik der Gesinnung durch eine solche der Verantwortung zu ersetzen.

Literatur

Finkelburg, W.: „Einführung in die Atomphysik“, Springer-Verlag 1967

Silk, J.: „Die Geschichte des Kosmos“, Spektrum Akad. Verlag 1996

Dickerson, R.E.; Geis, I.: „Chemie“, Verlag Chemie 1981

Stanley, S.M.: „Historische Geologie“ Spektrum Akad. Verlag 2001

Pawlek, F.: „Metallhüttenkunde“, de Gruyter Verlag, 1983

Gaskell, D.R.: „Introduction to the Thermodynamics of Materials“, Taylor & Francis
2003

Habashi, F.; Ed.: „Handbook of Extractive Metallurgy“, Wiley-VCH 1997

Chalmers, B.: „Physical Metallurgy“, Wiley & Son Inc. 1959

Horstmann, D.: „Das Zustandschaubild Eisen-Kohlenstoff“, Verlag Stahleisen, 1985

Weber, M.: „Politik als Beruf“, Büchergilde 1999.



TU Clausthal
Institut für Metallurgie

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Pluschkell

**Der Kosmos, die Erde
und Eisen und Stahl**

(Mai 2010)

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Pluschkell

Der Kosmos, die Erde und Eisen und Stahl

Prolog: Das Periodensystem der Elemente

- I. Kernfusion als Mechanismus der Element-Synthese
- II. Die Erde als Rohstoffspeicher
- III. Energetik chemischer Reaktionen
- IV. Thermodynamik carbothermischer Reaktionen
- V. Das Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff und der Werkstoff Stahl

Epilog: CO₂-Emissionen und Klima-Politik

Elementsymbol, Ordnungszahl und relative Atommasse (Atomgewicht)

1																		18	
1 H 1.0079	2											13		14	15	16	17	2 He 4.0026	
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180		
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948		
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80		
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc* 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29		
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33		72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po* 208.98	85 At* 209.99	86 Rn* 222.02		
87 Fr* 223.02	88 Ra* 226.03		104 Rf 261.11	105 Db 262.11	106 Sg 263.12	107 Bh 262.12	108 Hs	109 Mt	110 Uun ^a	111 Uuu ^a									

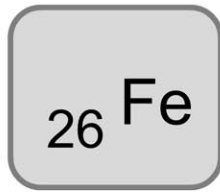
^a vorläufiges IUPAC-Symbol

57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm* 146.92	62 Sm 150.36	63 Eu 151.97	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
89 Ac* 227.03	90 Th* 232.04	91 Pa* 231.04	92 U* 238.03	93 Np* 237.05	94 Pu* 244.06	95 Am* 243.06	96 Cm* 247.07	97 Bk* 247.07	98 Cf* 251.08	99 Es* 252.08	100 Fm* 257.10	101 Md* 258.10	102 No* 259.10	103 Lr* 260.11

* Radioaktive Elemente; angegeben ist die Masse eines wichtigen Isotops.

(Wedler, G.: Lehrbuch der physikalischen Chemie; Wiley-VCH, Weinheim 2004)

Pluschkell, W.



Isotope	$^{54}_{26}\text{Fe}$	$^{56}_{26}\text{Fe}$	$^{57}_{26}\text{Fe}$	$^{58}_{26}\text{Fe}$
Relative Masse	53,9396	55,9349	56,9354	57,9333
Häufigkeit %	5,81	91,64	2,21	0,34
Mittlere relative Atommasse	55,847			
Schmelztemperatur	1809 K = 1536 °C			
Verdampfungstemperatur	3135 K = 2862 °C			
Elastizitätsmodul	$16,8 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ $0,10 \Omega \text{ mm}^2\text{m}^{-1}$			
Elektrischer Widerstand				
Dichte	7,86 g cm ⁻³			
Wertigkeit	2+, 3+			

} 300 K

1) Proton-Proton-Reaktion

$$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$$



(^4He -Bildung auch nach dem Bethe-Weizsäcker-Zyklus)

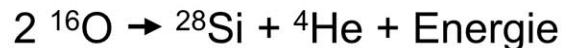
2) Drei-Alpha-Prozeß (Heliumbrennen)

$$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$$



3) $^{12}\text{C} + \text{}^4\text{He} \rightarrow \text{}^{16}\text{O} + \text{Energie}$

4) $T > 500 \cdot 10^6 \text{ K}$



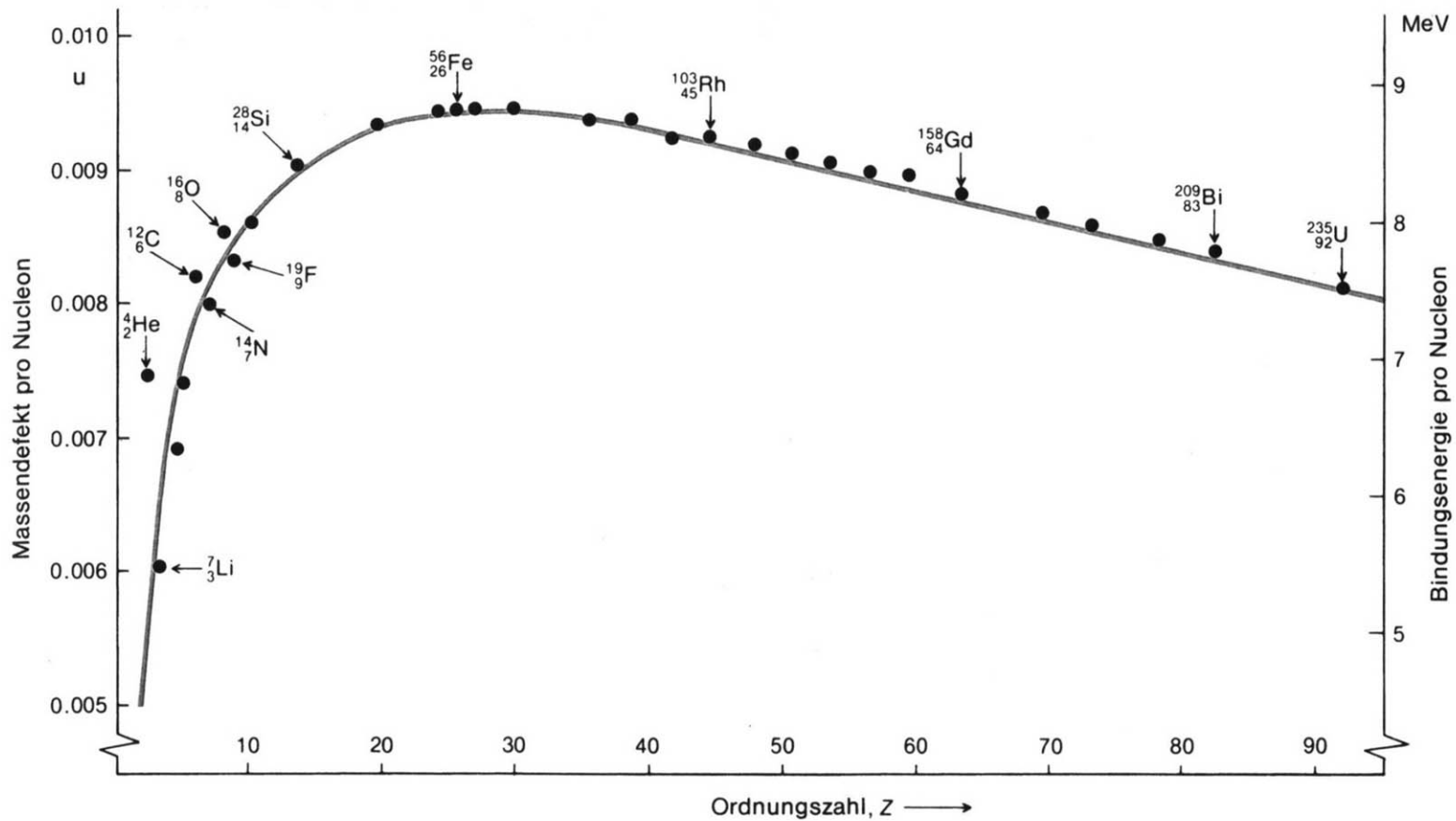
5) $T \sim 2 \cdot 10^9 \text{ K}$

exotherme Fusion bis ^{56}Fe

6) Trans-Eisen-Elemente nur durch endotherme Fusion

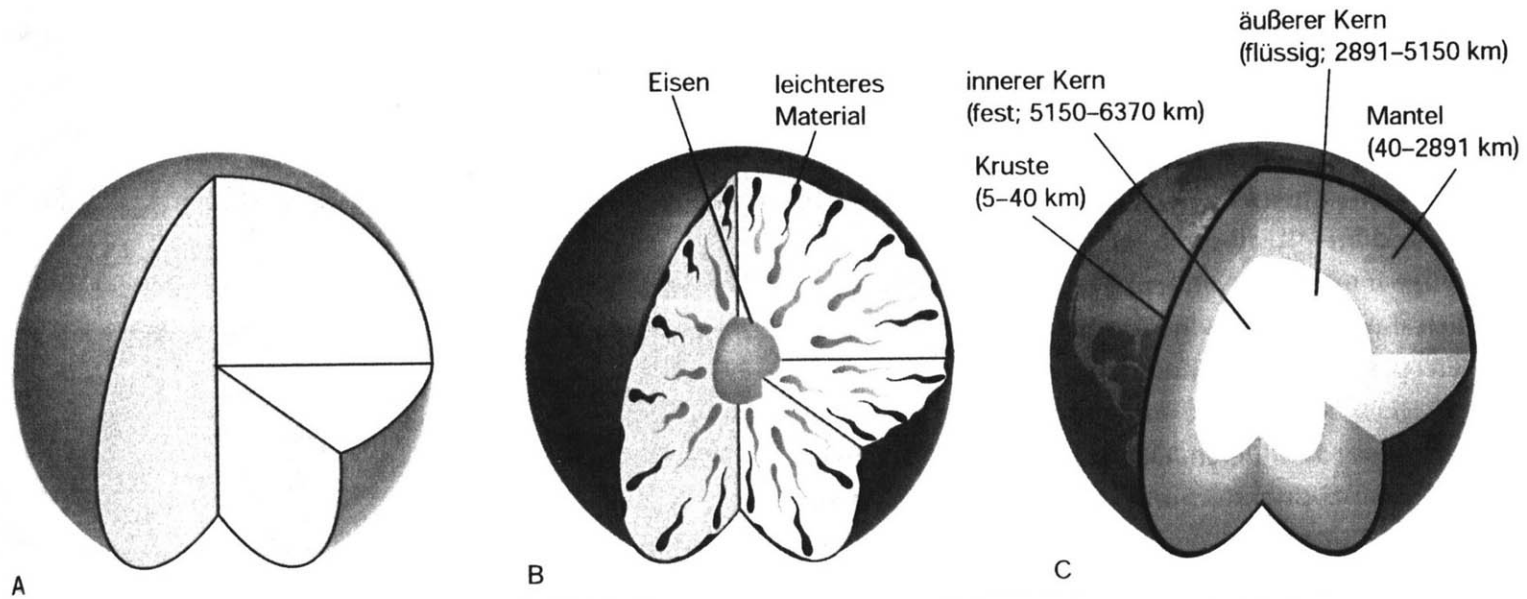


Fusionsreaktionen mit ^{56}Fe als „energetischem Umkehrpunkt“



Massendefekt und Bindungsenergie pro Nukleon
in Abhängigkeit von der Kernladungszahl

(Dickerson, R. E.; Geis, I.: „Chemie“, Verlag. Chemie 1981)

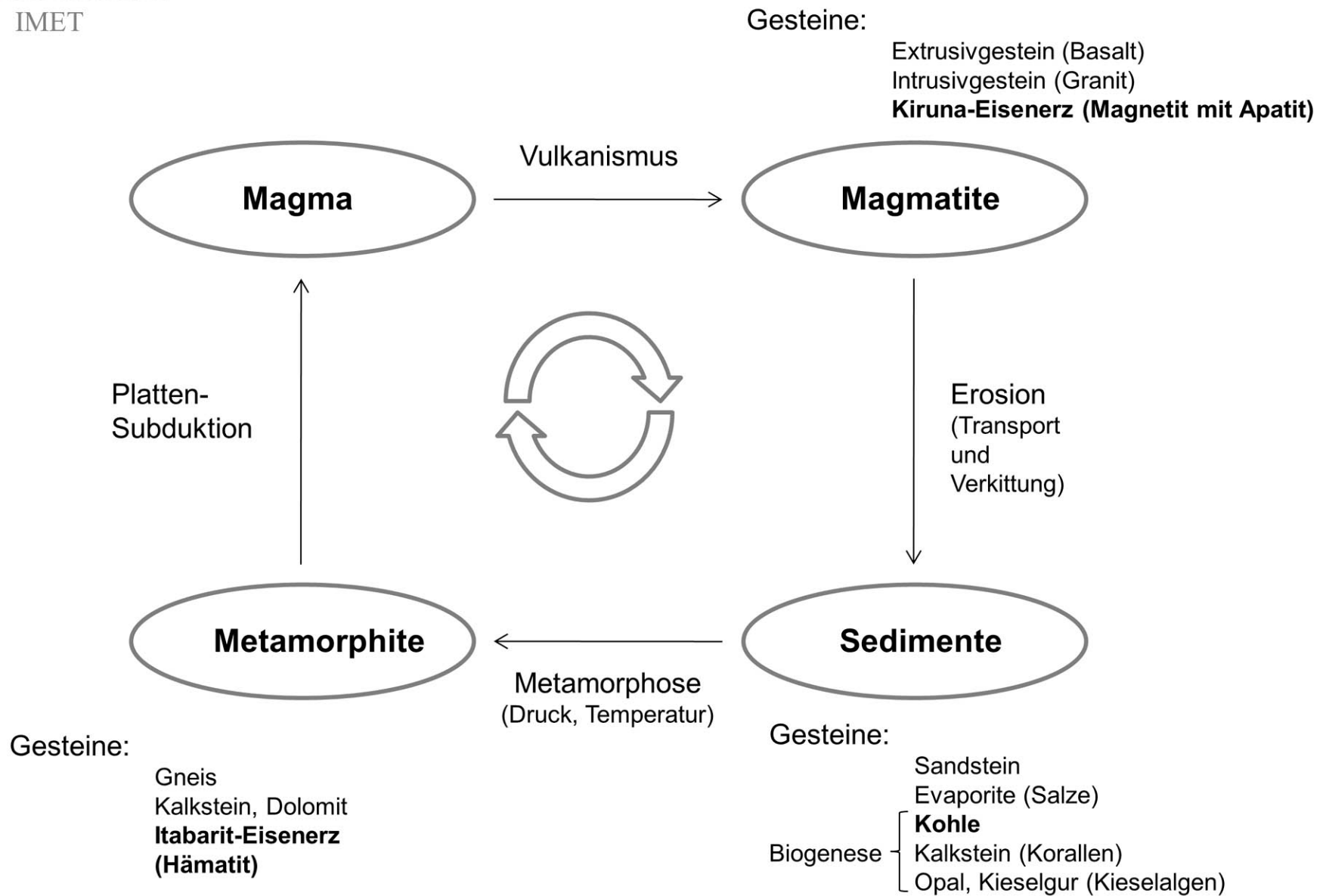


Schalenaufbau der Erde

(Stanley, S.M.: „Historische Geologie“; Spektrum Verlg. 2001)

100–10%		10–1%		1–0,1%		0,1–0,01%		0,01–0,001%		0,001–0,0001%		<0,0001%	
O	46,4	Al	8,23	Ti	0,57	Mn	0,095	Rb	0,0090	Th	0,00096	Tb	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Si	28,15	Fe	5,63	P	0,105	Ba	0,042	Ni	0,0075	Pr	0,00082	Lu	$5,0 \cdot 10^{-5}$
		Ca	4,15			Sr	0,037	Zn	0,0070	Sm	0,00060	Tm	$4,8 \cdot 10^{-5}$
		Na	2,36			S	0,026	Ce	0,0060	Gd	0,00054	Tl	$4,5 \cdot 10^{-5}$
		Mg	2,33			C	0,020	Cu	0,0055	Cs	0,00030	Sb	$2,0 \cdot 10^{-5}$
		K	2,09			Zr	0,016	Y	0,0033	Dy	0,00030	Cd	$2,0 \cdot 10^{-5}$
						V	0,013	La	0,0030	Hf	0,00030	Bi	$1,7 \cdot 10^{-5}$
						Cr	0,010	Nd	0,0028	Yb	0,00030	In	$1,0 \cdot 10^{-5}$
								Co	0,0025	Be	0,00028	Hg	$8,0 \cdot 10^{-6}$
								Li	0,0020	Er	0,00028	Ag	$7,0 \cdot 10^{-6}$
								Nb	0,0020	U	0,00027	Os	$5,0 \cdot 10^{-6}$
								Ga	0,0015	Sn	0,00020	Se	$5,0 \cdot 10^{-6}$
								Pb	0,0012	Ta	0,00020	Pd	$1,0 \cdot 10^{-6}$
								B	0,0010	As	0,00018	Pt	$5,0 \cdot 10^{-7}$
										Ge	0,00017	Ru	$5,0 \cdot 10^{-7}$
										W	0,00015	Au	$4,0 \cdot 10^{-7}$
										Mo	0,00015	Re	$1,0 \cdot 10^{-7}$
										Eu	0,00012	Rh	$1,0 \cdot 10^{-7}$
										Ho	0,00012	Ra	10^{-7}

Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste
(Pawlek, F.: „Metallhüttenkunde“, de Gruyter Verlag. 1982)



Genese der Gesteine und Lagerstätten

		Kiruna B Fines	Malmberget A Fines
		KBF	MAF
Fe ₃ O ₄	%	94.6	96.9
Fe ₂ O ₃	%	0.1	0.8
FeO	%		
MnO	%	0.10	0.05
CaO	%	0.47	0.18
MgO	%	0.48	0.35
Al ₂ O ₃	%	0.18	0.25
SiO ₂	%	1.1	0.60
TiO ₂	%	0.45	0.45
V ₂ O ₅	%	0.21	0.26
P ₂ O ₅	%	0.10	0.06
Na ₂ O	%	0.03	0.03
K ₂ O	%	0.08	0.02
LOI	%	0.21	0.07
Total	%	100	100
Fe	%	69.8	70.7
Mn	%	0.08	0.04
V	%	0.12	0.15
Cu	%	<0.002	<0.001
Cr	%	<0.001	<0.001
Ni	%	<0.03	<0.02
Zn	%	<0.004	<0.003
P	%	0.045	0.025
S	%	0.02	0.01
F	%	0.03	0.01
Cl	%	0.02	0.007

		KBF	MAF
Moisture	%	3.7	3.0
Fe natural state	%	67.2	68.6
Density	t/m ³	5.1	5.1
Bulk density	t/m ³	3.2	3.1
Stowage factor	m ³ /t	0.31	0.32
Angle of repose	°	41	37
Screen analysis			
	Opening mm	% passage	
	5.6		
	4.0	98	
	2.0	73	98
	1.0	53	82
	0.5	43	47
	0.25	34	22
	0.125	24	10
	0.063	13	4

Aufbereitetes Sinterfeinerz mit niedrigem
Phosphor-Gehalt

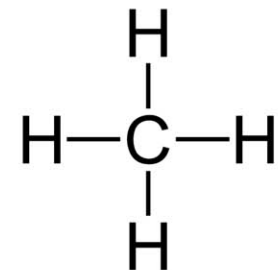
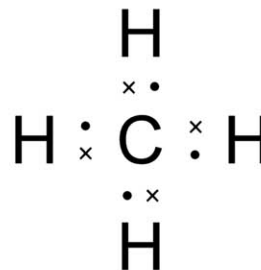
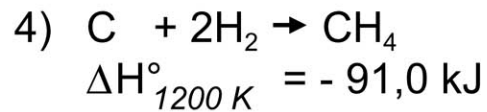
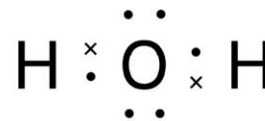
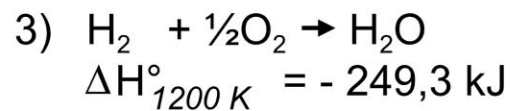
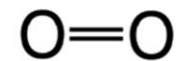
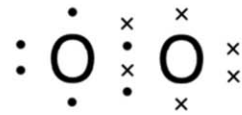
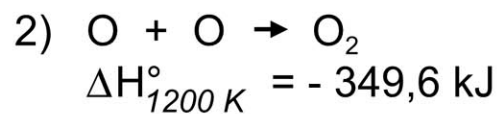
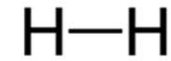
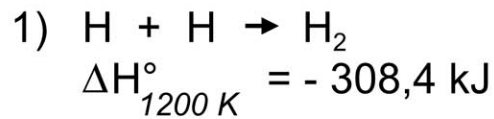
Low Phosphorus Sinter Feed

(Mitteilung LKAB, 2005)

Metall	Erzart	Mineral	Lagerstätte	Konzentration des Hauptmetalls und wichtige Beimengungen im Fördererz	Durchschnittliche Konzentration des Hauptmetalls im Konzentrat
Fe	Magnet-eisenstein	Fe_3O_4	Kirunavara (Schweden)	45–65% Fe SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, P	67–71% Fe
Al	Bauxit	$\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ + $\gamma\text{-AlOOH}$	Weipa (Australien)	ca. 55% Al_2O_3 $\cong 29\%$ Al H_2O , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , (Ga)	ca. 52% Al (Tonerde mit ca. 99% Al_2O_3)
Cu	Kupferkies + Kupfer- glanz (in Quarz- monzonit)	CuFeS_2 + Cu_2S	a) Bingham (Utah) b) Chuqui- camata (Chile)	a) 0,6–0,7% Cu b) 1,4% Cu SiO_2 , CaO, MgO (Mo, As, Ag)	ca. 27% Cu
Zn	Pyrit mit Zinkblende	ZnS	Meggen (Sauerland)	7–9% Zn S, Fe, Pb, SiO_2	ca. 55% Zn
Pb	Bleiglanz	PbS	Broken Hill (Australien)	6–15% Pb 5–12% Zn Cu, Au, Ag, Fe	ca. 75% Pb
Sn	Zinnsteinseife (Sand- ablagerungen)	SnO_2	Bangka (Indonesien)	0,05–0,5% Sn Fe, SiO_2 , As, W	ca. 72% Sn
U	Sandstein- Uranerz (mit Coffenit + Carnotit)	$\text{U}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_4$ + $\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{V}_2\text{O}_8)$ $\sim 3\text{H}_2\text{O}$	Jack Pile (USA)	ca. 0,2% U_3O_8	ca. 70% U („yellowcake“ mit ca. 82% U_3O_8)

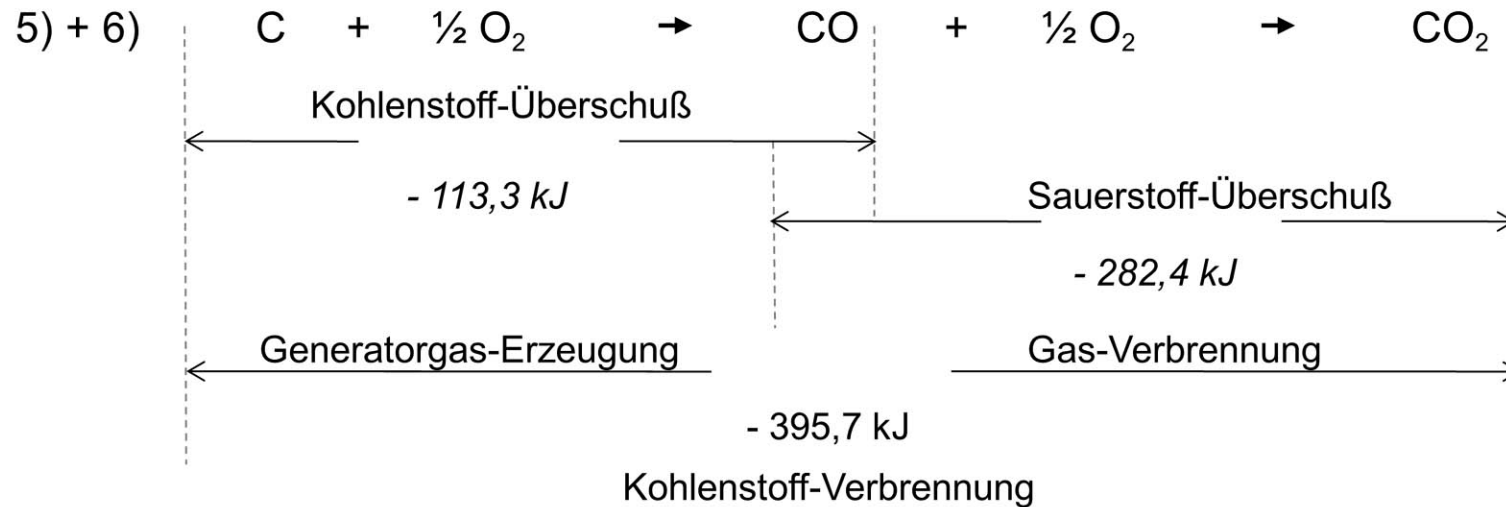
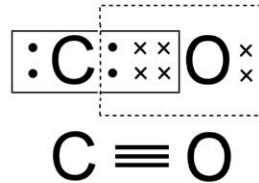
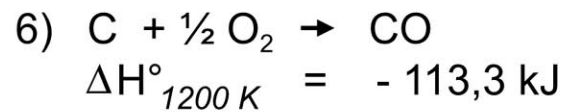
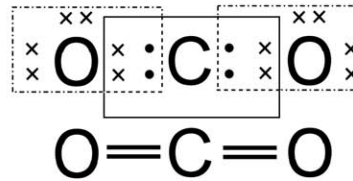
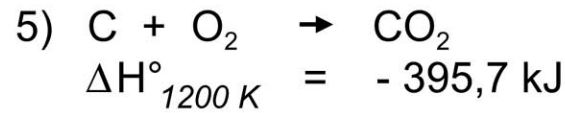
Typische Erze von Gebrauchsmetallen und Uran Typical ores of commercial metals and uranium

(Winnacker K.; Küchler, L.: Chemische Technologie;
Bd.6 Metallurgie, Hanser Verlg. München 1973)



Energetik einiger Elementarreaktionen

(ΔH_T° in kJ je molarem Formelumsatz)

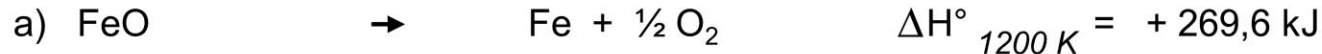


Oxidation von Kohlenstoff in zwei Stufen
 $(\Delta H^\circ_{\text{T}}$ in kJ je molarem Formelumsatz)



Reaktionen von Eisen mit Sauerstoff
(ΔH_T° in kJ je molarem Formelumsatz)

(10)



a) + b)



$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$

ΔG° : Gibb'sche Freie Reaktionsenthalpie

ΔH° : Reaktionsenthalpie

ΔS° : Reaktionsentropie

$\Delta G^\circ = + 156,3 - 0,159 \cdot T \text{ kJ}$

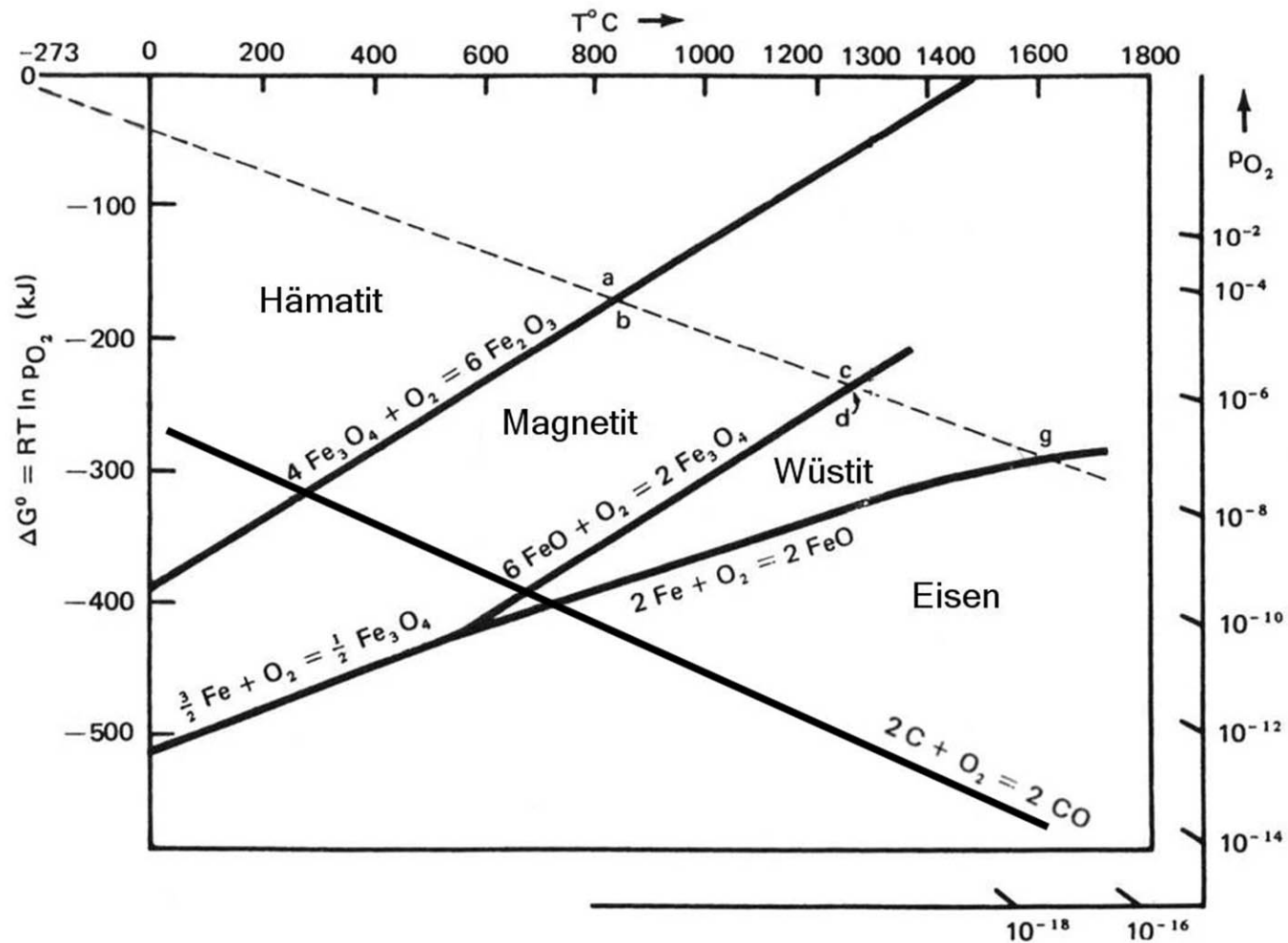
$\Delta G^\circ_{1200 \text{ K}} = - 34,5 \text{ kJ}$

$\Delta G^\circ = 0, \text{ wenn } T = 983 \text{ K} \triangleq 710^\circ\text{C}$



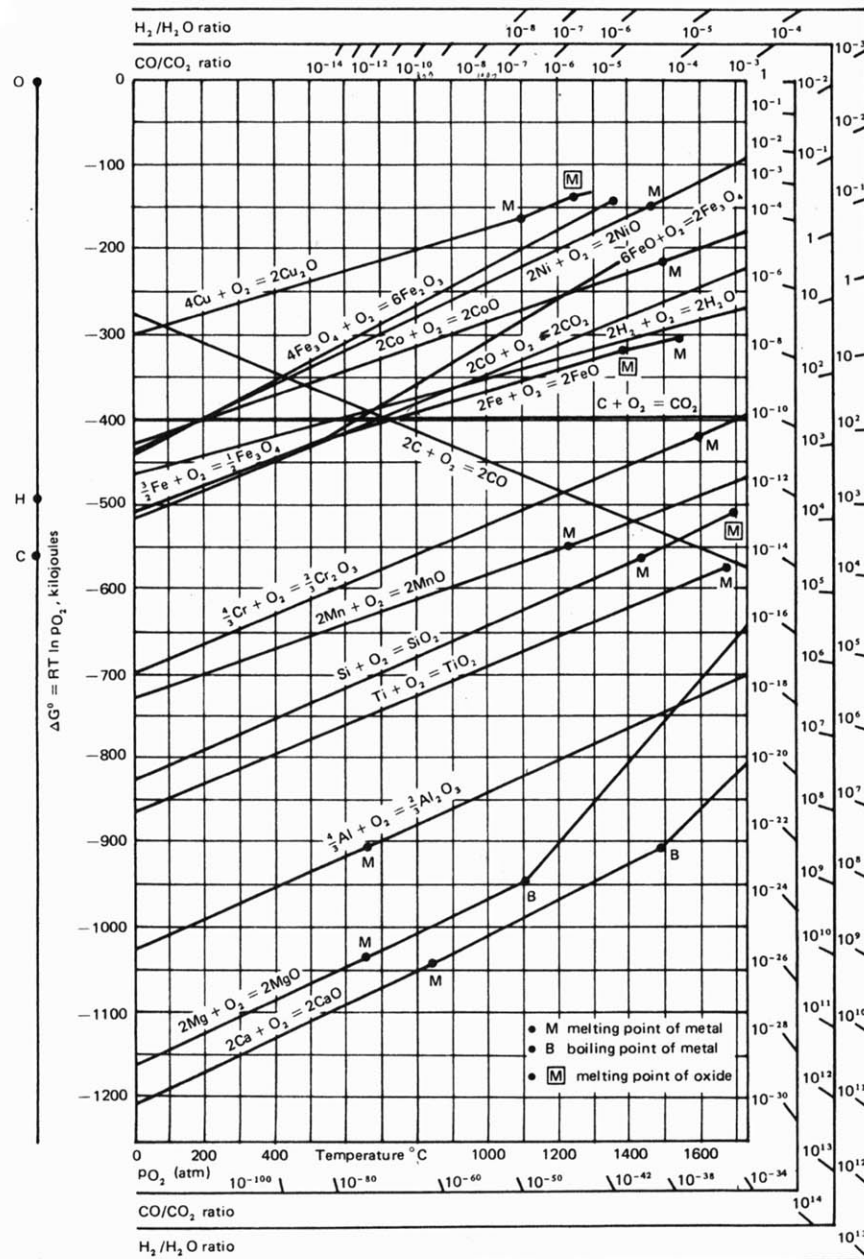
Reduktion von Wüstit FeO mit Kohlenstoff, Kohlenmonoxid
und Wasserstoff zu metallischem Eisen

(ΔH° & ΔG° in kJ, ΔS° in kJ/K je molarem Formelumsatz)



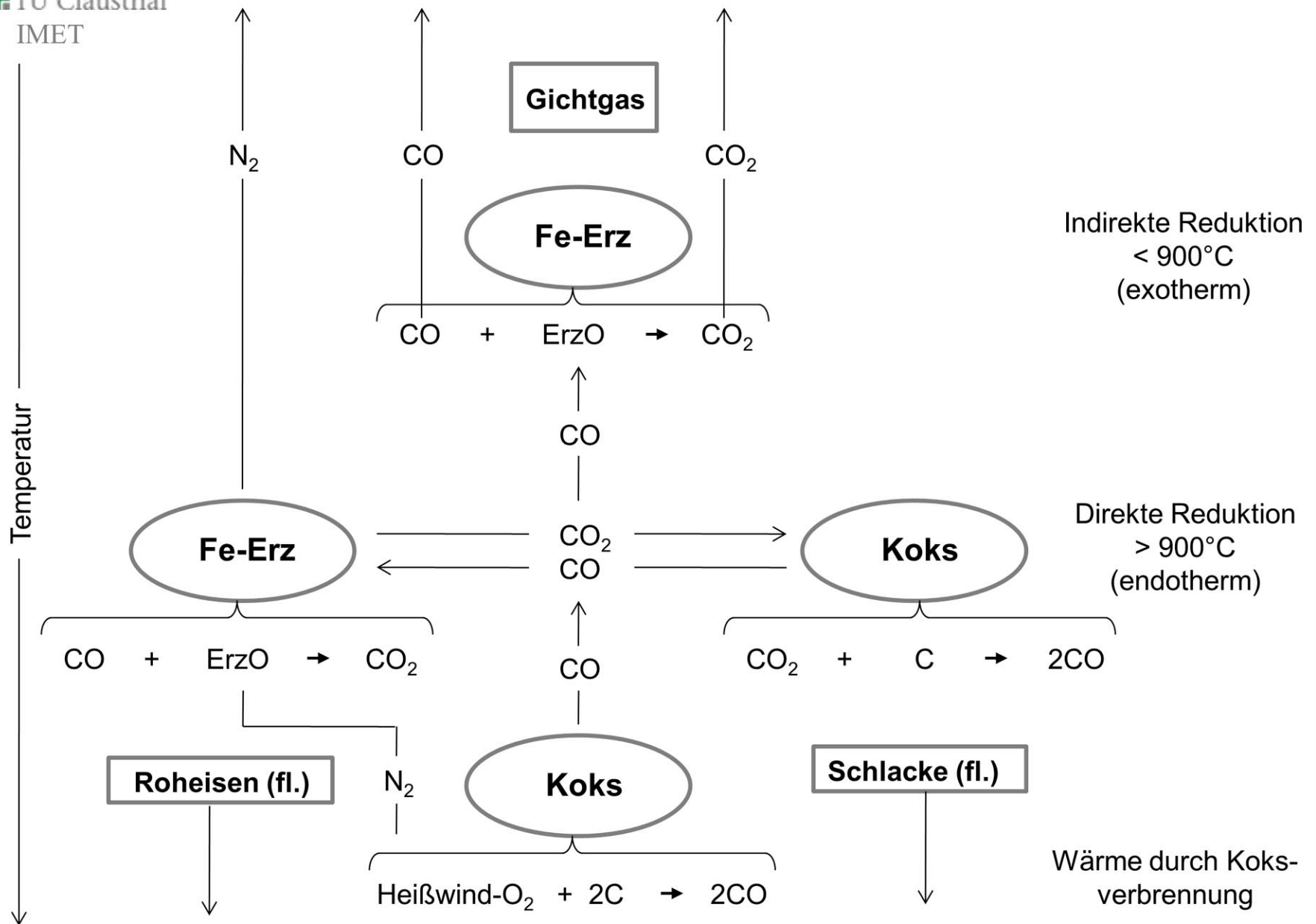
Phasenstabilität im System Fe-Fe₂O₃ als
Funktion von $\Delta G^\circ = RT \ln p_{O_2}$

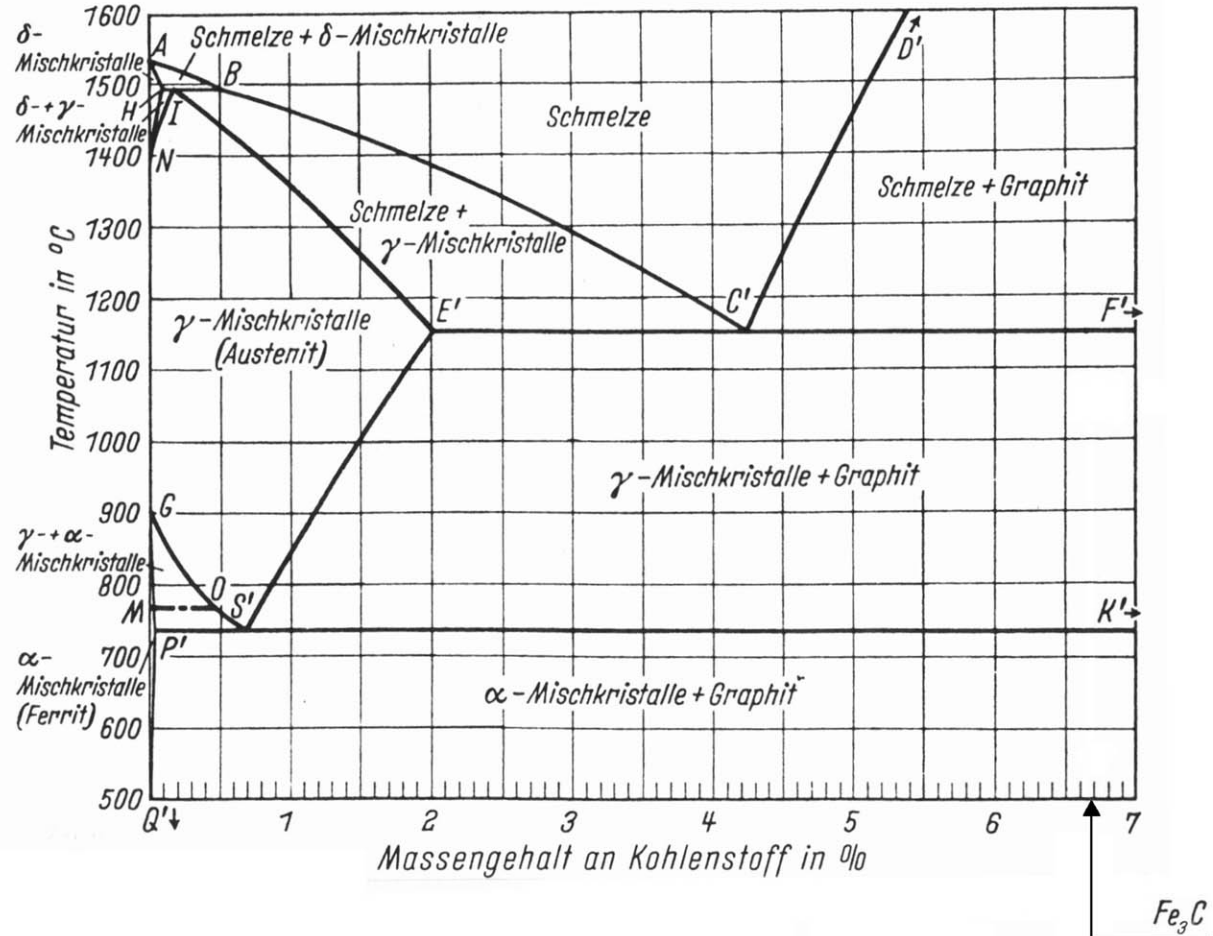
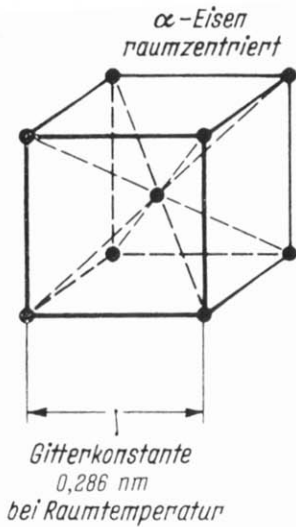
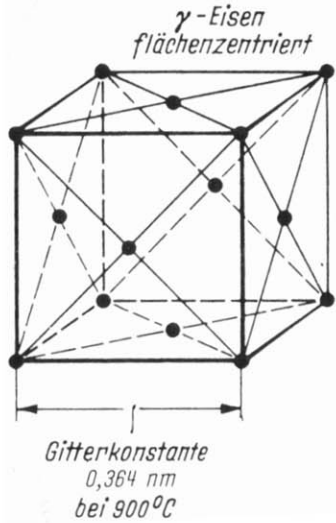
(Gaskell, D.R.: Introduction to Metallurgical Thermodynamics, Hemisphere Publ. Corp. 1981)



Ellingham/Richardson/Jeffes-Diagramm für metallurgische Red/Ox-Systeme

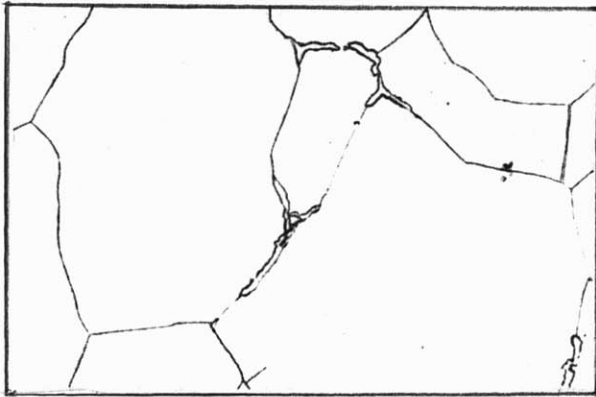
(Gaskell, D.R.: Introduction to Metallurgical Thermodynamics, Hem. Publ. Corp. 1981)



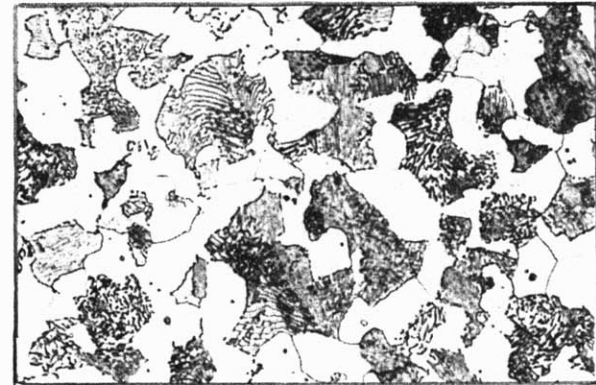


Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff

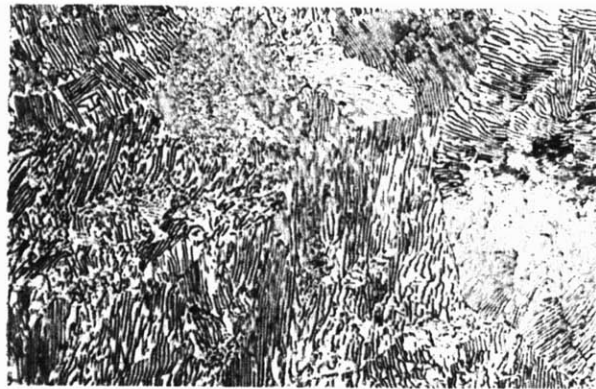
(Horstmann, D.: „Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff“, Verlg. Stahleisen Düsseldorf, 1985)



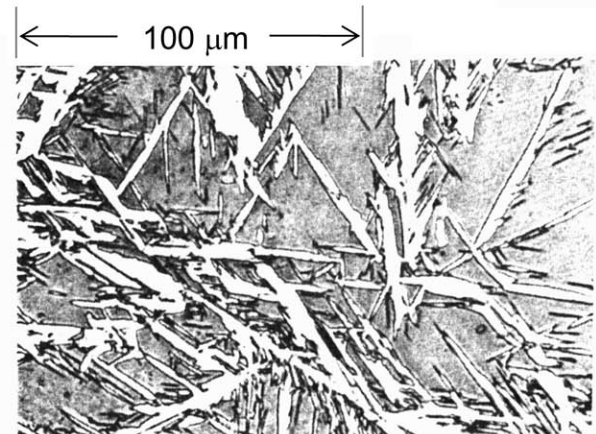
Gefüge einer sehr kohlenstoffarmen Eisen-Kohlenstoff-Legierung. [Ferrit mit Ausscheidungen von Tertiärzementit auf den Korngrenzen] (Ätzung: alkoholische Salpetersäure)



Umwandlung in der Perlitstufe



Gefüge einer eutektoidischen Eisen-Kohlenstoff-Legierung. [Perlit, d. h. Lamellen von Zementit und Ferrit] (Ätzung: alkoholische Pikrinsäure)



Gefüge eines von 1050 °C abgeschreckten Stahles mit 1,2 Massen-% C und 3,2 Massen-% Mn [Martensit (hell) und Restaustenit (dunkel)] (Ätzung: alkoholische Pikrinsäure)

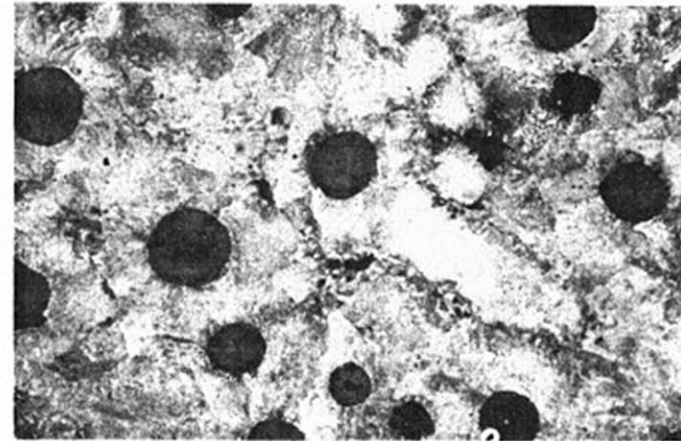
Gefüge von Eisen/Kohlenstoff-Legierungen (Fe/C-Stähle)

(Horstmann, D.: „Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff“, Vergl. Stahleisen Düsseldorf, 1985)

← 500 µm →



Graphitlamellen in einer ferritisch-perlitischen Grundmasse (Ätzung: alkoholische Pikrinsäure)



Perlitisches Gußeisen mit Kugelgraphit (Ätzung: alkoholische Pikrinsäure)

Gefüge von Grauguß

(Horstmann, D.: „Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff“, Verlg. Stahleisen Düsseldorf, 1985)

Anhang

Internationales Einheitensystem

(7 SI-Basiseinheiten: Meter / Sekunde / Kilogramm /
Ampere / Kelvin / Mol / Candela)

Energie als gesetzliche Einheit:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$$

Weitere gesetzliche Energie-Einheiten:

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kWs} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ eV} \triangleq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \triangleq 96,47 \text{ kJmol}^{-1}$$

Alte Energie-Einheiten:

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ tSKE} = 29,308 \text{ GJ}$$

Äquivalenz von Masse und Energie nach $\Delta E = \Delta mc^2$

$$c = 299793 \text{ km s}^{-1}$$

$$\Delta m = 1 \text{ kg} \triangleq 8,988 \cdot 10^7 \text{ GJ}$$

Energie - Einheiten

1 Mol: Stoffmenge eines einheitlichen Stoffes, die seiner relativen Atom-/Molekülmasse in Gramm entspricht (Grammatom/-molekül)

Avogadro - Fundamentalkonstante N_A :

Anzahl der Atome oder Moleküle, die in einem Mol eines Stoffes enthalten sind (auch als Loschmidt-Konstante bezeichnet)

$$N_A = 6,0221354 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

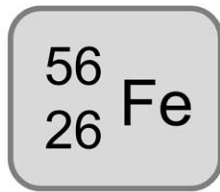
$$\begin{aligned} 1 \text{ mol H} &\triangleq 1,00797 \text{ gH} ; & 1 \text{ Atom } {}^1\text{H} &\triangleq 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ 1 \text{ mol Fe} &\triangleq 55,847 \text{ gFe} ; & 1 \text{ Atom } {}^{56}\text{Fe} &\triangleq 9,288 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{aligned}$$

Die atomare Masseneinheit wird mit u bezeichnet. $u \triangleq 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Die Elementarteilchen Proton/Neutron/Elektron weisen folgende elektrische Ladungen und Ruhemassen auf:

	Ladung	Ruhemasse
Proton	+1	$1,00728 \text{ u} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	0	$1,00867 \text{ u} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Elektron	- 1	$0,00055 \text{ u} = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Das Mol als Basiseinheit der Stoffmenge



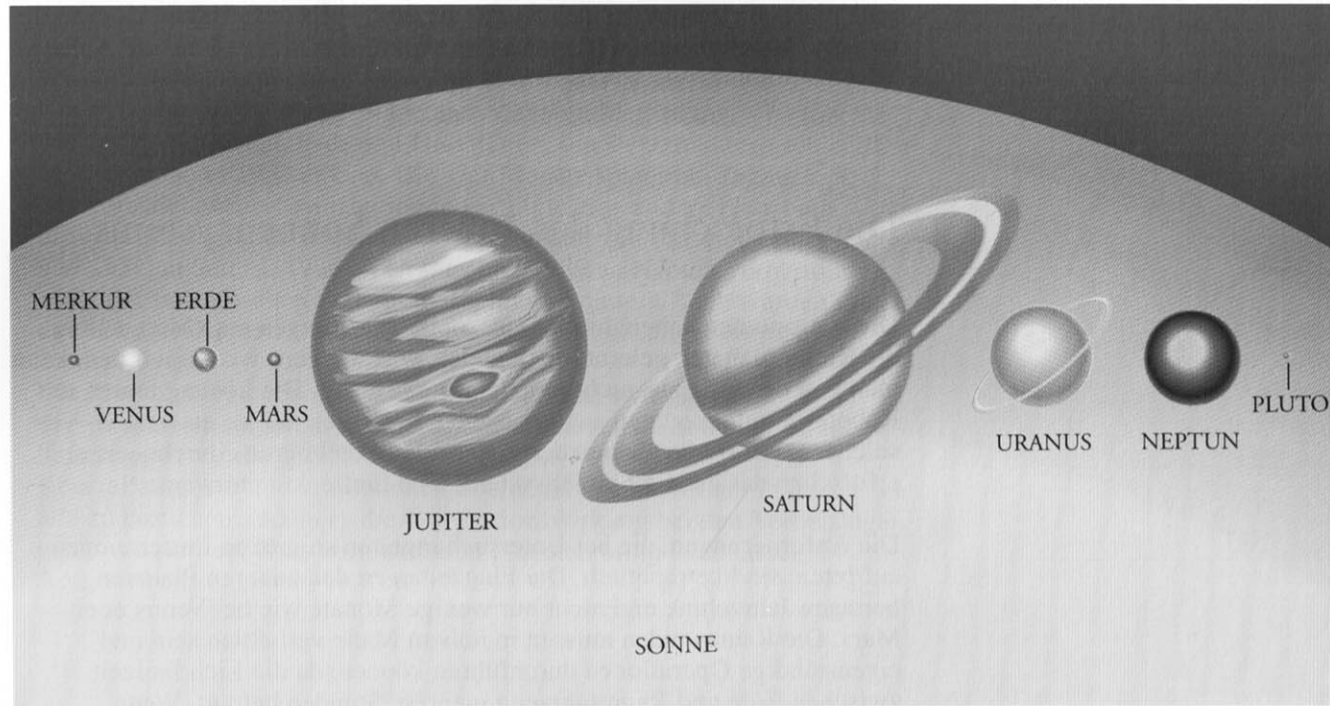
mit 26 Protonen, 26 Elektronen, 30 Neutronen

26 Protonen	$\underline{\underline{=}}$	26,190 u
26 Elektronen	$\underline{\underline{=}}$	0,014 u
30 Neutronen	$\underline{\underline{=}}$	30,261 u
<hr/>		
Summe	$=$	56,465 u
Wahre Masse ${}^{56}_{26}\text{Fe}$	$=$	55,935 u
<hr/>		
Massendefekt Δm	$=$	- 0,530 u
<hr/>		
Massendefekt pro Nukleon	$=$	- 9,46 * 10 ⁻³ u
<hr/>		
$\Delta E = \Delta mc^2$	$\underline{\underline{=}}$	-9,46 * 10 ⁻³ * 931,4
	$=$	8,81 MeV pro Nukleon
ΔE	$=$	8,5 * 10 ⁸ GJ/t Fe

$$1\text{u} = 931,4 \text{ MeV};$$

$$1\text{eV} = 96,5 \text{ kJ Mol}^{-1}$$

Masseneffekt und Bildungsenergie je Nukleon am Beispiel ${}^{56}_{26}\text{Fe}$



Die Planeten

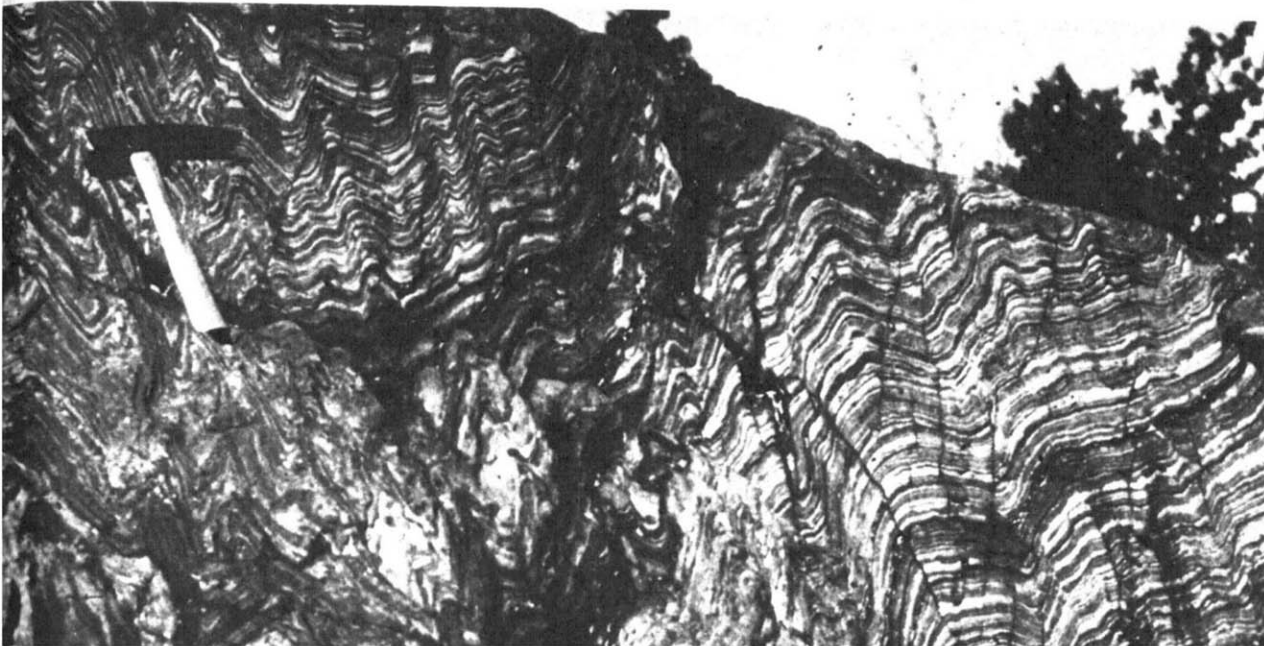
Name	Entfernung zur Sonne (AE)	Periode (Jahre)	Durchmesser (km)	Masse (Erde = 1)	Dichte (Wasser = 1)
Merkur	0,4	0,24	4878	0,055	5,4
Venus	0,7	0,61	12 104	0,82	5,3
Erde	1,0	1,00	12 756	1,00	5,5
Mars	1,5	1,88	6 794	0,11	3,9
Jupiter	5,2	11,9	142 800	318	1,3
Saturn	9,5	29,5	120 000	94	0,7
Uranus	19	84	52 400	15	1,2
Neptun	30	165	50 400	17	1,5
Pluto	40	249	2 200	0,002	2,2

Daten der Planeten

(Morrison, D.: „Planetenwelten“, Spektrum Verlg. 1995)

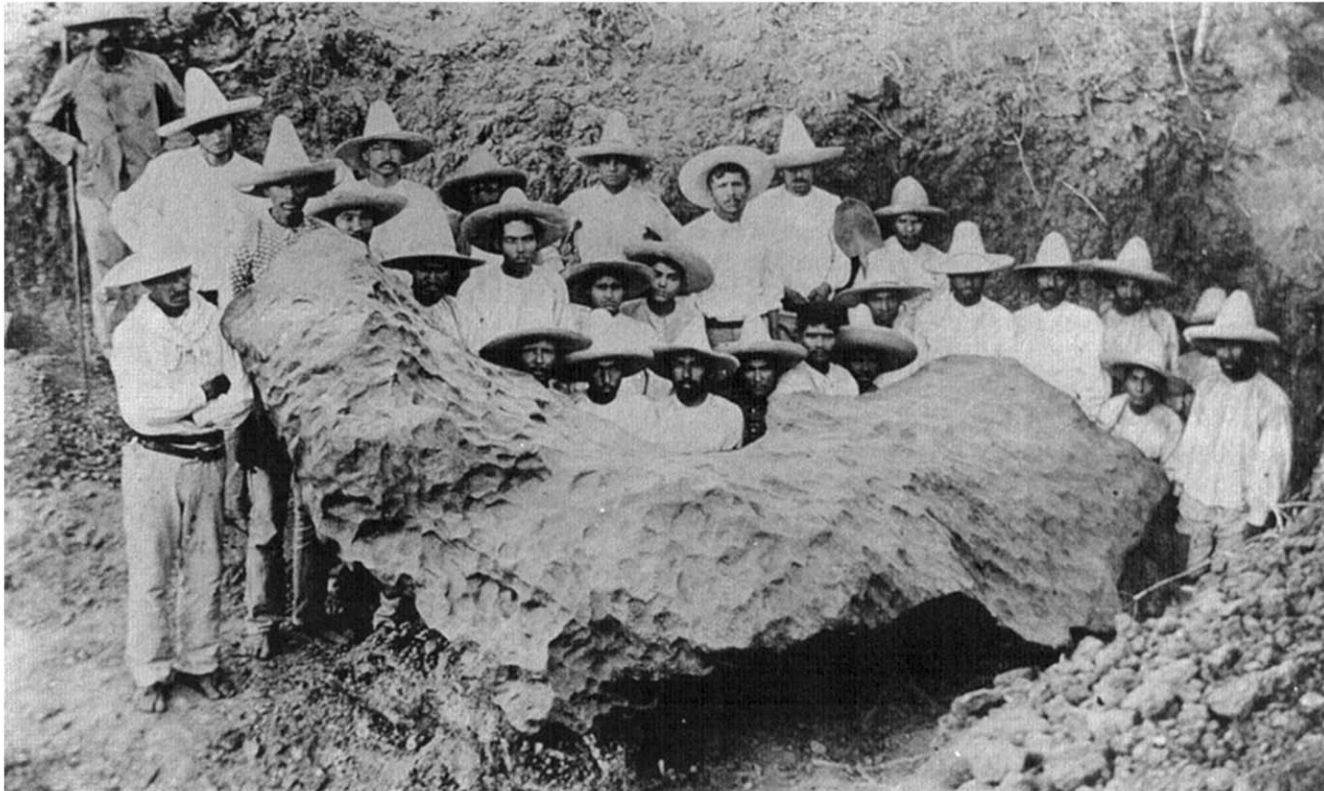
Pluschkell, W.

A4



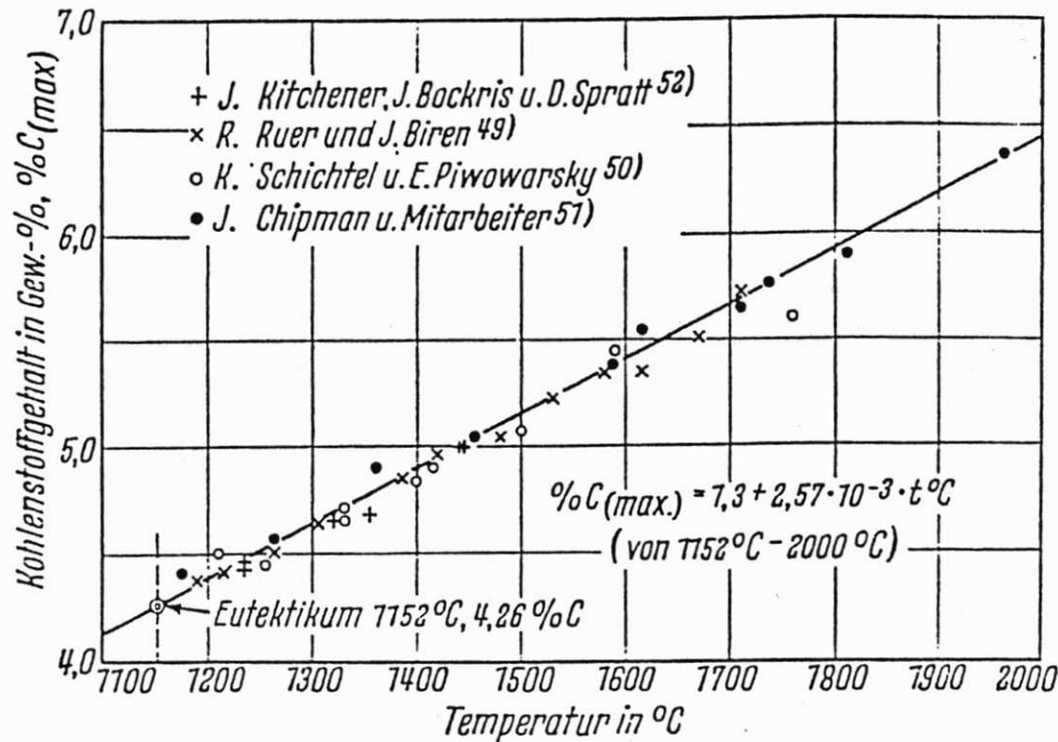
Tektonisch deformiertes Bändereisenerz
(rd. $2 \cdot 10^9$ Jahre; Jasper Knop, Michigan USA)

(Stanley, S.M.: „Historische Geologie“; Spektrum Verlag. 2001)



26t Eisenmeteorit, Mexico 1876

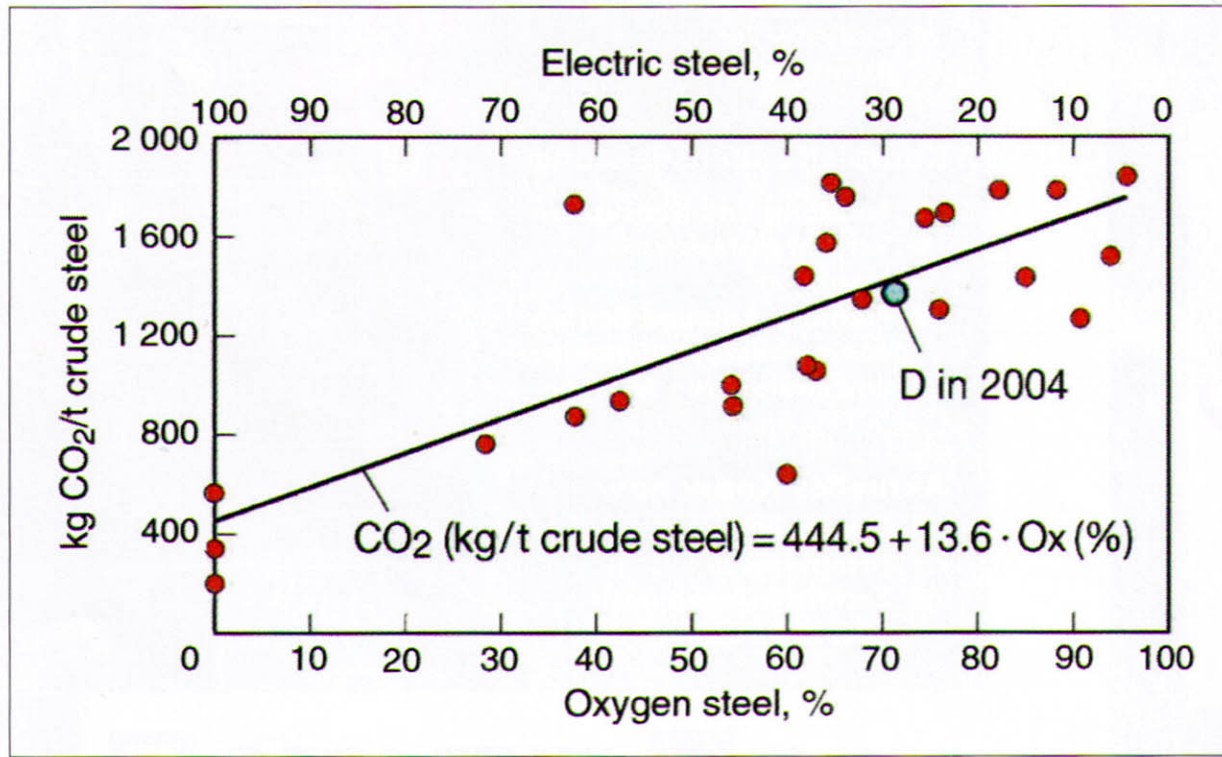
(Morrison, D.: „Planetenwelten“, Spektrum Verlg. 1995)



Die Löslichkeit des Kohlenstoffs in flüssigen Eisen-Kohlenstoff-Lösungen nach verschiedenen Forschern in Gewichtsprozentdarstellung

$$\begin{aligned}
 [\%C]_{\max} = & 1,30 + 2,57 \cdot 10^{-3} \cdot t (^{\circ}C) \\
 & + 0,027 \cdot [\%Mn] \\
 & - 0,317 \cdot [\%Si] \\
 & - 0,33 \cdot [\%P] \\
 & - 0,36 \cdot [\%S]
 \end{aligned}$$

(Neumann, F.; Schenck, H.; Patterson, W.: Gießerei, Techn. wiss. Beihefte 23 (1959), S. 1217/1246)



CO₂ emissions per t of crude steel in 26 OECD countries versus mix of process routes (source: RWI, H. G. Buttermann, based on data from IEA statistics)

CO₂-Emissionen pro t Rohstahl für 26 OECD-Länder in Abhängigkeit vom Verhältnis Elektro- zu Sauerstoffblasstahlerzeugung (Quelle: RWI, H. G. Buttermann, nach IEA Statistikdaten)

Fossil sources: carbon contents and CO₂-effect, estimated [11]

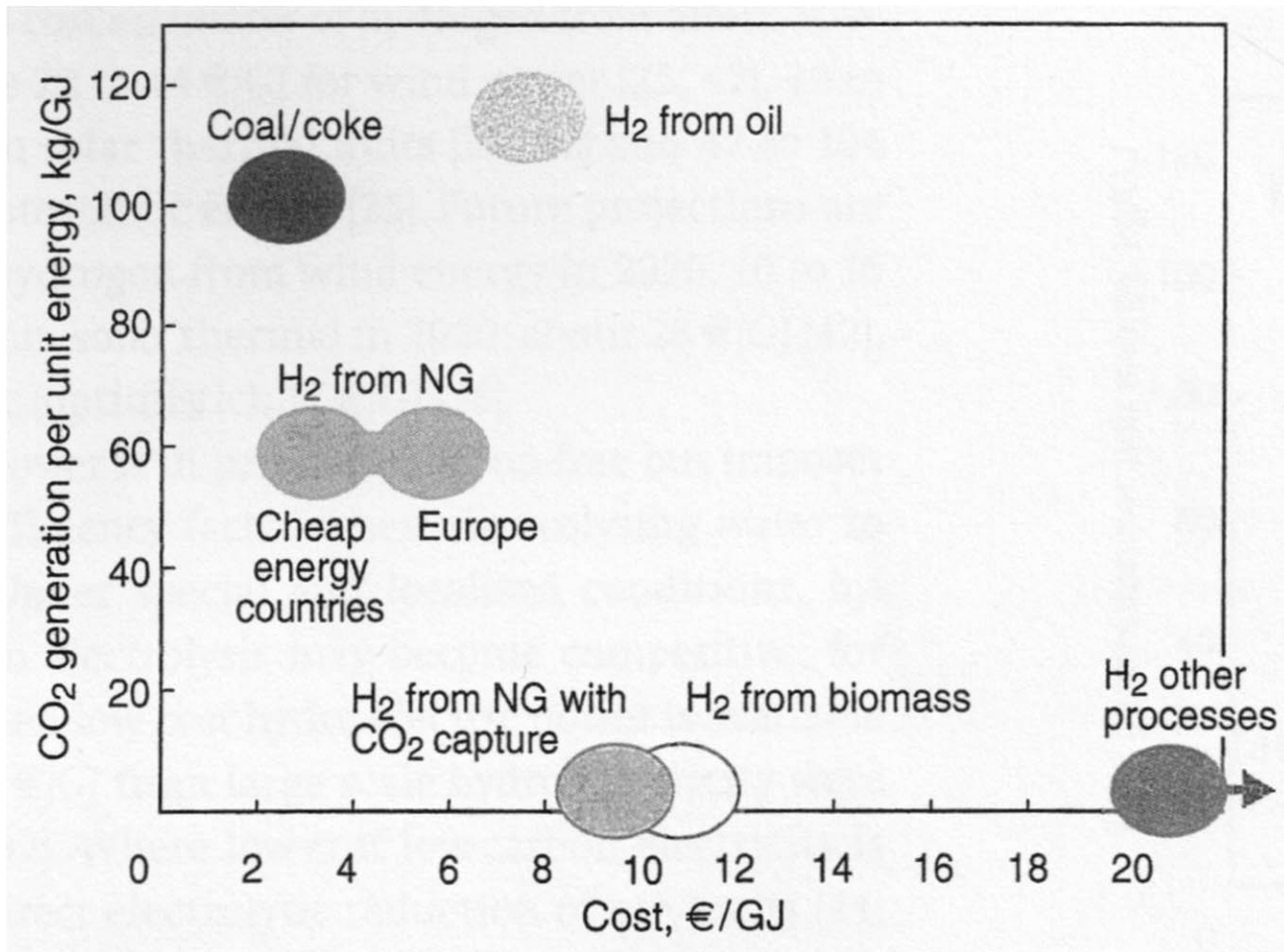
Fossile Ressourcen: Kohlenstoffanteile und CO₂-Effekt, geschätzt [11]

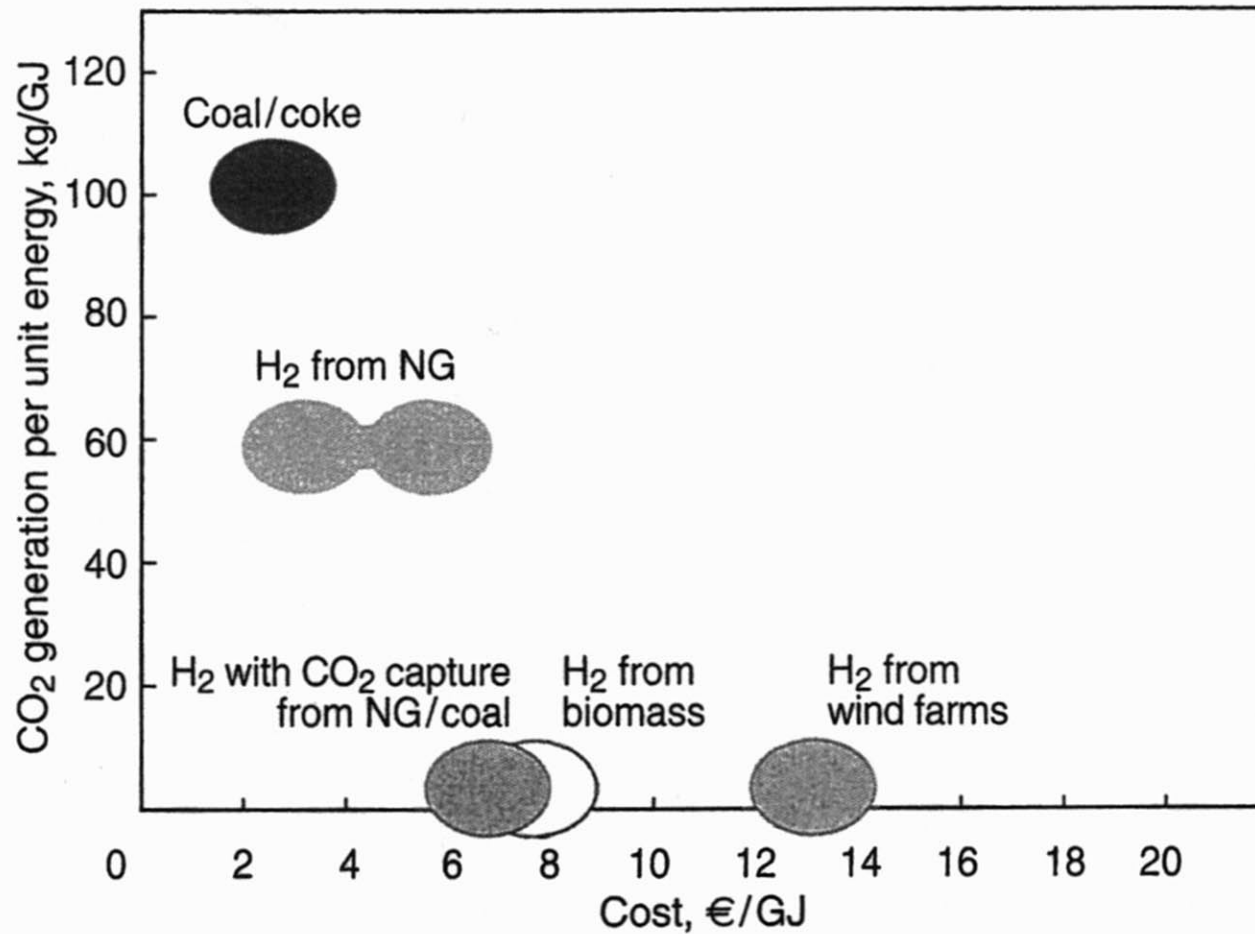
	Stoichiometry (only C, H)	C/(C+H) %	CO ₂ kg/GJ
Carbon (coke)	C	100	112
Coal	C H 0.8	94	88 - 115
Wood	C H 1.44	89	
Biomass	C H 2	86	98
Oil	C H 1.5-2	87	74 - 76
Propane	C H 2.7	82	65
Natural gas	C H 3.7	76	60 - 65
Methane	C H 4	75	55

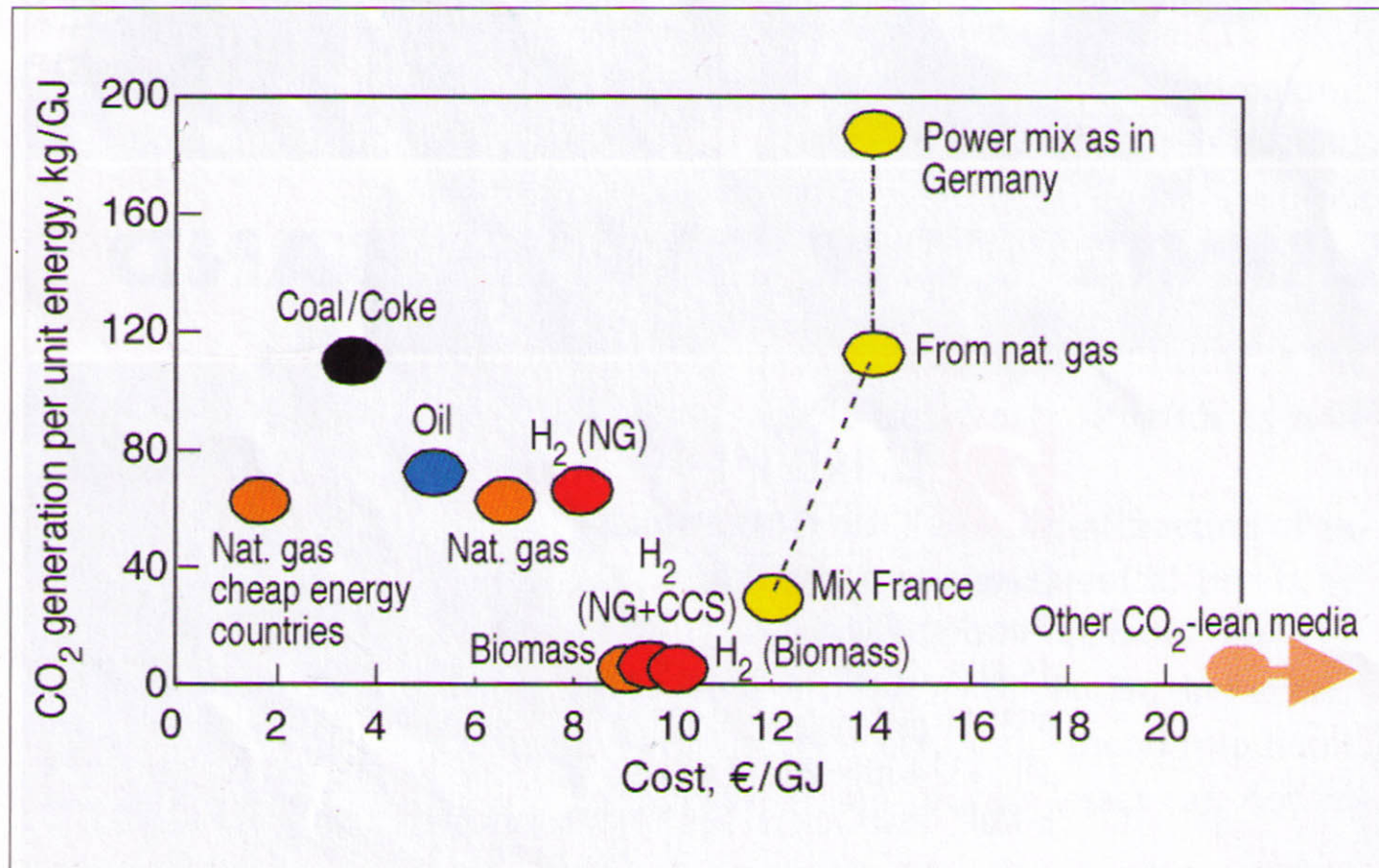
	CO ₂ kg/GJ	Cost €/GJ	Abatement cost €/t CO ₂
Coke/coal	110	3.5	reference
Oil	75	5	43
Natural gas	63	6.5	64
Natural gas, cheap energy countries	63	2.0	-32
Electricity coal-powered (Europe)	264	14	no abatement
Electricity from natural gas (Europe)	111	14	no abatement
Electricity, nuclear	0	14	95
Electricity, power mix Germany	186	14	no abatement
Electricity, power mix France	25	12	100
Biomass renewable	0	9	50
Hydrogen from natural gas + CCS	0	9	50
Hydrogen from coal gasification	153	9	no abatement
Hydrogen from oil	118	7	no abatement
Hydrogen from natural gas (Europe)	68	8.5	119
Hydrogen from biomass	0	10	59
Hydrogen from nuclear power	0	20	150
Hydrogen from wind power	0	23	177
Hydrogen from solar thermal	0	48	405
Hydrogen from solar photovoltaic	0	75	650

CO₂-effect, costs per unit energy, and CO₂ abatement cost for the substitution of coke/coal by various media. Price estimates as of 2005; prices for electric power: European average unless indicated otherwise

CO₂-Effekt, Kosten pro Energieeinheit und CO₂-Minderungskosten bei der Substitution von Koks/Kohle durch verschiedene Medien. Schätzungen für 2005. Strompreise sind Mittelwerte für Europa, sofern nicht anders angegeben







Das Gas soll unter die Erde



Kohlendioxid ist ein Gas, um dessen Gefährlichkeit gestritten wird. Immerhin ist es mit 0,04 Prozent in der Luft enthalten. Bürgerinitiativen indes bemühen drastische Bilder wie Totenköpfe und Sauerstoffmasken, um auf mögliche Gefahren hinzuweisen. Das liegt auch an den Plänen der

Energiekonzerne. Sie wollen das Kohlendioxid tief im Boden versenken, damit es dort – hoffentlich – für immer bleibt. Dass es unter der Erde keinen Schaden anrichtet, bezweifeln die Aktivisten und kämpfen auf **Seite 12** gegen die Verpressungspioniere von Vattenfall.

Foto Matthias Lüdecke

Periodensystem der Elemente

Elementsymbol, Ordnungszahl und relative Atommasse (Atomgewicht)

1

18

1 H 1.0079	2																2 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc* 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33		72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po* 208.98	85 At* 209.99	86 Rn* 222.02
87 Fr* 223.02	88 Ra* 226.03		104 Rf 261.11	105 Db 262.11	106 Sg 263.12	107 Bh 262.12	108 Hs	109 Mt	110 Uun^a	111 Uuu^a							

^a vorläufiges IUPAC-Symbol

57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm* 146.92	62 Sm 150.36	63 Eu 151.97	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
89 Ac* 227.03	90 Th* 232.04	91 Pa* 231.04	92 U* 238.03	93 Np* 237.05	94 Pu* 244.06	95 Am* 243.06	96 Cm* 247.07	97 Bk* 247.07	98 Cf* 251.08	99 Es* 252.08	100 Fm* 257.10	101 Md* 258.10	102 No* 259.10	103 Lr* 260.11

* Radioaktive Elemente; angegeben ist die Masse eines wichtigen Isotops.